INVESTIGACION y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

CONTROL DE LAS ABEJAS ASESINAS

FARMACOS DE DISEÑO

PROGRESOS EN SUPERCONDUCTIVIDAD



ESTRELLA DE NEUTRONES EN COLISION

FEBRERO 1994
700 PTAS.



Febrero de 1994 Número 209



SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

J. M. García de la Mora: *Caída de la natalidad en el Tercer Mundo* y *Ensayo*; Mónica Murphy: *Observatorio Compton de rayos gamma*; Joandomènec Ros: *Dispersión de las abejas africanizadas*; Jorge Gálvez Alvarez y Ramón García Doménech: *Fármacos de diseño*; Luis Bou: *Osciladores acoplados y sincronización biológica* y *Juegos matemáticos*; Ana M.ª Rubio: *Cultos funerarios de Malta*; Juan P. Adrados: *Al corriente;* J. Vilardell: *Hace...* y *Taller y laboratorio*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Shigeko Suzuki: *De cerca*

Ciencia y sociedad:

J.-M. V. Martínez y J.-D. Ros

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver y J.-M. Terricabras

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: George Retseck

Página	Fuente
5	Pascal Maitre y Yves Gellie/Matrix
6-7	Johnny Johnson
8-9	Joe Connors/Univ. Johns Hopkins
10	Johnny Johnson
11	Mary Beth Camp/Matrix
12-15	Guilbert Gates y Jared Schneidman
16	Gabor Kiss (*arriba*), EGRET Team (*abajo*)
17	COMPTEL Team
18	EGRET Team (*izquierda*), Jared Schneidman (*derecha*)
19	EGRET Team (*izquierda*), Jared Schneidman (*derecha*)
21	Carlos Ibáñez
22-27	E. Hernández, J. Piomo, M. T. del Teso y J. Díaz
39	Scott Camazine/Photo Researchers, Inc.
40	Ian Worpole
41	Lorraine Beaman, USDA ARS Honey-Bee Breeding, Laboratorio de Genética y Fisiología
42	Universidad de California Cooperative Extension (*arriba*), Ian Worpole (*abajo*)
43	Ian Worpole
44	Scott Camazine/Photo Researchers, Inc.
47-48	William M. Carson
49-50	Michael Goodman
51	William M. Carson
52	Lisa Burnett (*izquierda*), John Erickson, Instituto Nacional del Cáncer (*arriba, derecha*), A. Tulinsky, Universidad estatal de Michigan (*abajo, derecha*)
55	Ivan Polunin
56	Jason Goltz; relojes cortesía de Nostalgic Times, Nueva York (*izda.*), Archivo Bettmann (*dcha.*)
57-59	Gordon Akwera/JSD
60	Walter Taylor, Universidad de Harvard (*arriba*), Gordon Akwera/JSD (*abajo*)
62-63	Caroline Malone y Simon Stoddart
64	Johnny Johnson (*arriba*), Museo Nacional de Arqueología, Malta (*abajo*)
65	Caroline Malone y Simon Stoddart
66-67	Patricia J. Wynne, según dibujos de Steven Ashley y Caroline Malone; Caroline Malone y Simon Stoddart (*fotografías*)
68-69	Caroline Malone y Simon Stoddart
70	American Superconductor Corp.
71	Dan Connolly
72-73	Laboratorio Nacional de Oak Ridge
74	Superconductor Technologies, Inc. (*izquierda*), Du Pont (*derecha*)
75	Conductus Inc.
76	Laboratorio Lawrence Berkeley (*arriba*), Stanley Rowin (*abajo*)
77	American Superconductor Corp.
82	Andrew Christie
84	Andrew Christie



La fotografía de la portada muestra uno de los fenómenos más violentos y que más energía desprenden de cuantos tienen lugar en el cosmos: la colisión de dos estrellas de neutrones. Cuando se topan, su fortísima gravedad las destroza, produciéndose un brillante estallido de radiación y dos chorros opuestos de partículas que se mueven a alta velocidad. Quizá sea la fusión de estrellas de neutrones el origen de las singulares explosiones de rayos gamma que destellan en numerosos puntos del cielo (véase "Observatorio Compton de rayos gamma", por Neil Gehrels, Carl E. Fichtel, Gerald J. Fishman, James D. Kurfess y Volker Schönfelder, en este número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
Juan Pedro Campos
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
M.ª Cruz Iglesias Capón
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; John Rennie, Russell Ruthen, *Associate Editors*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; John Horgan; Marguerite Holloway; *Senior Writer*; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.400	15.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA

Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

....cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Si sus neumáticos se gastan y en su opinión habría que hacer algo sobre el particular, tiene usted toda la razón. Y algo se está haciendo. Los neumáticos sintéticos ya son buenos, pero serán excelentes. Tras realizar el pasmoso milagro de crear, en poco más de dos años, una nueva industria de gran complejidad capaz de producir caucho sintético a un ritmo superior al que hasta ahora los americanos consumían el producto de los árboles gomeros, la iniciativa e ingenio persiguen ahora una nueva meta: conseguir un producto sintético de tal calidad y a tal precio que nunca deseemos retornar al caucho natural.»

«El piloto automático goza con todo merecimiento de una magnífica reputación. Sin embargo, nunca dejó de existir cierta tendencia a creer que no funcionaría bien del todo con un tiempo muy borrascoso. Ahora Wright Field avisa de la existencia de un nuevo piloto automático de control electrónico desarrollado por la empresa Minneapolis-Honeywell. La sensibilidad de su mecanismo electrónico es tal, que devuelve al avión a su rumbo pese a las contracorrientes, la variabilidad del viento y los chorros de aire provocados por el estallido de las granadas antiaéreas.»

«La reciente disminución en el ritmo de descubrimiento de nuevos campos petrolíferos ha suscitado la cuestión de lo que puede hacerse para satisfacer las demandas de una era postbélica que se anuncia con mentalidad automovilística y aeronáutica. Gran Bretaña, Alemania y Japón están fabricando crudos y gasolina sintéticos. Es el momento de acometer un programa de investigación riguroso que ponga a nuestra disposición procedimientos para abastecernos de los combustibles líquidos necesarios a partir de carbones cuando comience a fallar el suministro del petróleo.»

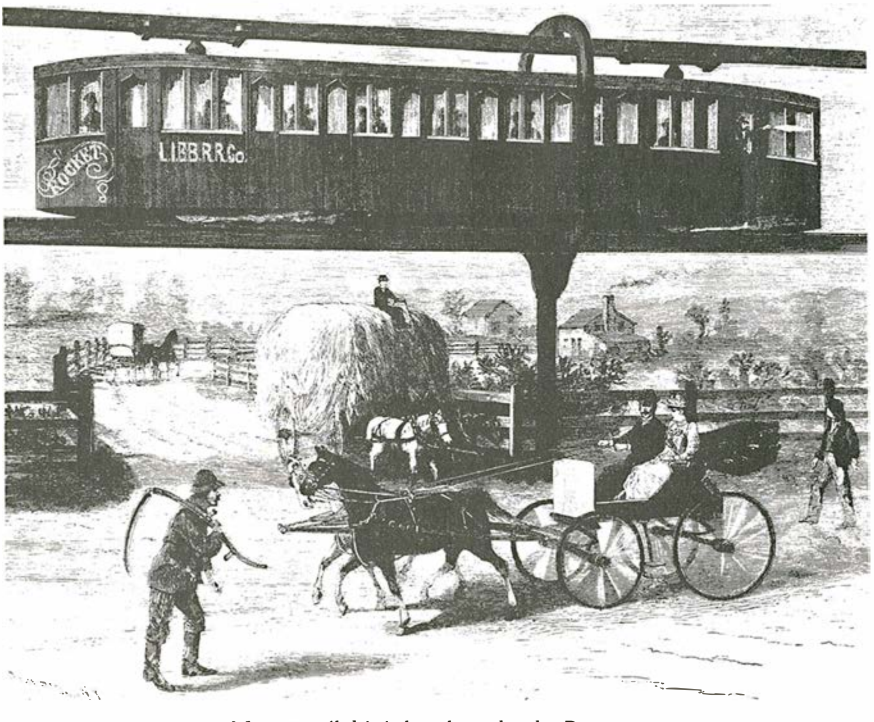
...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «El 30 de enero de 1894 expiró la patente de Bell sobre el teléfono y el invento pasó a propiedad pública; por ello, quien lo desee puede construir, comprar o vender teléfonos sin temor a infringir los derechos de nadie. Esto es válido únicamente para el instrumento manual que actualmente se emplea como receptor. Las patentes sobre otros artefactos telefónicos aún siguen vigentes; pero con lo que hay disponible basta para valernos del descubrimiento. Con dos instrumentos de mano y una llamada adecuada, puede mantenerse una comunicación, si las condiciones son favorables, a lo largo de una línea de unos doce o quince kilómetros y sin necesidad de batería.»

«Parece que en Inglaterra gana favor una solución al problema de enlazar por ferrocarril la isla con el continente. Consistiría en instalar, bajo el agua, uno o dos conductos metálicos capaces de permitir el paso de trenes. Según los cálculos, el coste total de ese ferrocarril tubular no debería exceder, como máximo, de 375 millones.»

«Sabemos ahora que el germen del cólera se encuentra en el cuerpo humano sólo en los intestinos y que no se contagia directamente entre las personas, pero las evacuaciones alvinas de sus víctimas se abren paso, generalmente a través del agua, hasta los intestinos de las personas propensas a la enfermedad, quienes así se convierten en nuevas víctimas; sabemos también que el germen halla su criadero en los suelos pantanosos, en las charcas estancadas y en las corrientes de agua que contengan materias orgánicas, y que es rápidamente destruido por los germicidas oficinales, la desecación, los ácidos y por temperaturas inferiores a los trece grados o superiores a los cincuenta y dos.»

«Hoy día son indispensables unos transportes públicos rápidos. En la ilustración mostramos uno de los últimos avances en medios de esa índole. Nos referimos al monorraíl eléctrico biciclo de Boynton, del que está en período de construcción una línea que cruzará Long Island, desde Bellport al Sound. La idea del monorraíl biciclo es facilitar un sistema de transporte rápido cuya velocidad pudiera ser de ciento veinte a ciento sesenta kilómetros por hora o más. En este ferrocarril se emplea un coche estrecho de frentes biselados, el cual va montado sobre dos ruedas, una en cada extremo, y se mueve sobre un único raíl. Su equilibrio es similar al de una bicicleta y, como ésta, elimina los violentos esfuerzos de torsión transversales que tanto afectan a los vehículos de cuatro ruedas. Se adapta especialmente bien a la propulsión eléctrica, con un raíl superior que alberga el conducto de la corriente.»



Monorraíl biciclo elevado de Boynton

Caída de la natalidad en el Tercer Mundo

En muchos países en vías de desarrollo está disminuyendo el tamaño familiar. Las razones de esta reducción proporcionan la clave para frenar el crecimiento de la población

Bryant Robey, Shea O. Rutstein y Leo Morris

El mundo en vías de desarrollo está experimentando una revolución reproductora. Por todo el Tercer Mundo mujeres de niveles culturales, políticos, sociales y económicos muy distintos han empezado a desear menos hijos. Los índices de natalidad, o de fecundidad como también se les llama, han descendido una tercera parte desde mediados de la década de los sesenta: antes las mujeres tenían una media de seis hijos; ahora tienen cuatro.

Contra las expectativas de muchos observadores, los países en vías de desarrollo no están experimentando la transición demográfica de muchos países industrializados registrada durante el pasado siglo. En EE.UU. y el Reino Unido, por ejemplo, el declinar de la natalidad se produjo sólo después de que el auge económico hubiera supuesto mejoras sanitarias y educativas. La transición duró muchos decenios.

En cambio, datos recientes indican que en el mundo subdesarrollado los índices de natalidad han disminuido sin las concomitantes mejoras de las condiciones de vida. Además, el descenso ha sido sorprendentemente rápido. Estos países, tal parece, se han beneficiado de la creciente influencia y alcance de los programas de planificación familiar, de las nuevas técnicas anticonceptivas y de la eficacia pedagógica de los medios de comunicación.

Estos resultados tienen extraordinarias implicaciones para los esfuerzos futuros por frenar el crecimiento de la población. Pese a la observada disminución de la natalidad, la población mundial sigue aumentando: se espera que en el año 2050 el número de habitantes se haya duplicado hasta llegar a 10.000 millones. Y se calcula que el 97 % de ese aumento se producirá en los países que hoy están en vías de desarrrollo, donde más de una tercera parte de la población no ha cumplido todavía los 15 años.

Tras examinar los resultados de recientes estudios demográficos y de planificación familiar, hemos podido discernir las causas directas e indirectas de la caída de la natalidad en estos paíes y entender en qué difieren de las que originaron la transición demográfica de Occidente. Gracias a ello podemos señalar el camino para fomentar con la máxima eficacia tan inesperada cuan bienvenida revolución.

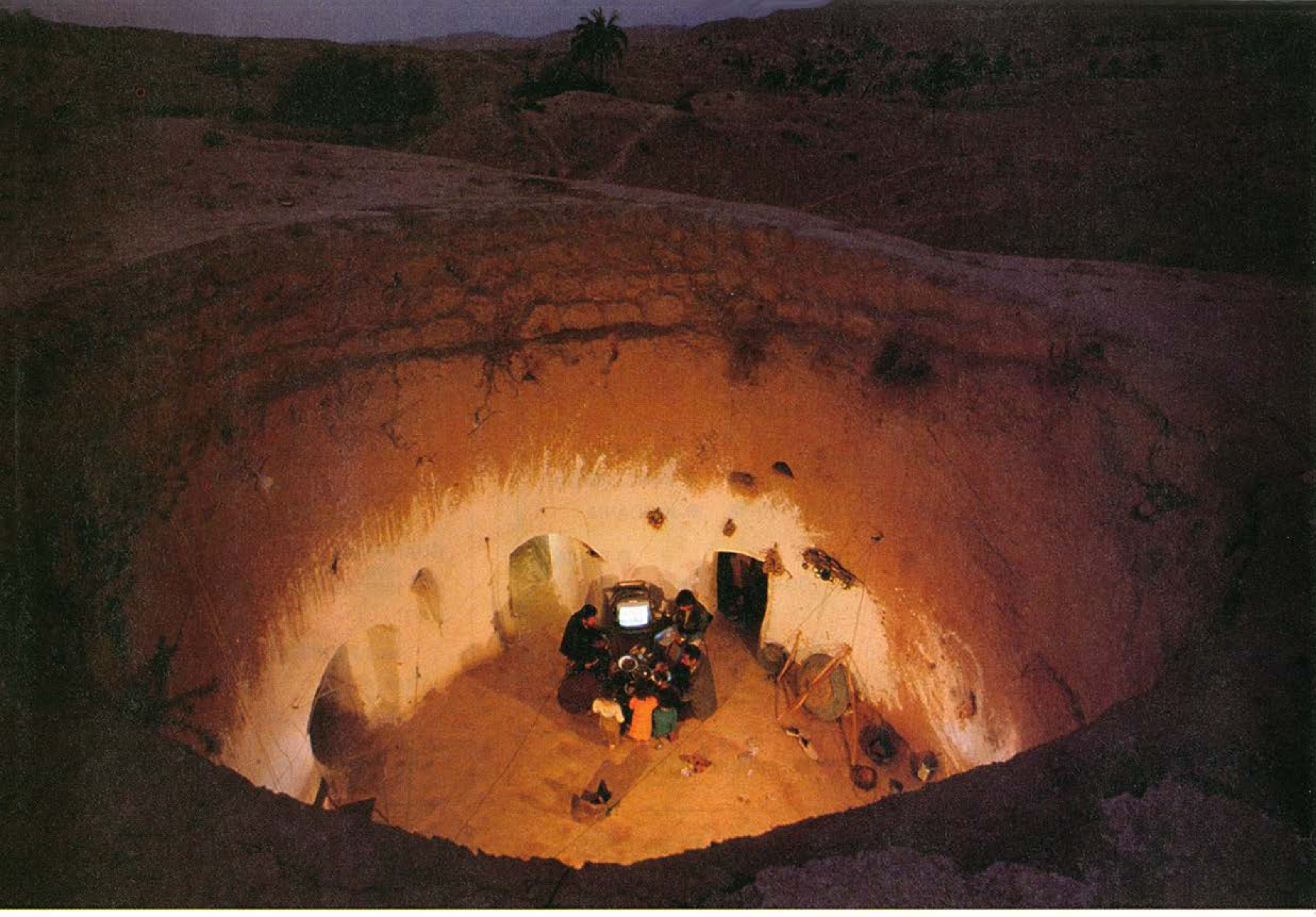
Los últimos datos sobre fecundidad en los países en vías de desarrollo se han recogido en 44 encuestas realizadas a más de 300.000 mujeres durante los últimos ocho años en 18 países del Africa subsahariana, 16 de Iberoamérica y del Caribe, 6 del norte de Africa y del Oriente Medio, y 4 de Asia. Estas encuestas, financiadas por la Organización estadounidense para el Desarrollo Internacional, fueron de dos tipos: encuestas demográficas y sanitarias efectuadas por Macro International, Inc. y los estudios de planificación familiar coordinados por los Centros para el Control de la Enfermedad de Estados Unidos; el muestreo ofreció información representativa y parangonable de esos países. Otras encuestas nacionales independientes proporcionan algunos datos de otras seis naciones más, entre ellas China, India y Bangladesh.

Estas investigaciones son la continuación de un empeño internacional iniciado hace 20 años. Antes de la encuesta sobre la fertilidad mundial emprendida en 1972, nunca se había intentado reunir datos completos y comparables sobre la natalidad y la planificación familiar de las naciones del Tercer Mundo. Ahora son más de 30 los países que han registrado ese material, lo mismo en la encuesta sobre la natalidad mundial, terminada en 1984, que en la actual ronda de encuestas que se inició en 1985. Valiéndose de estos registros, los demógrafos pueden representar las tendencias de la natalidad y programar la planificación familiar para más de dos décadas. En conjunto, estos programas constituyen uno de los esfuerzos más ambiciosos en investigación sociológica.

Estas bases de datos a gran escala permiten el acceso a una información sin parangón sobre las actitudes y la conducta reproductora de las mujeres del mundo subdesarrollado. En cada país muestreado se escogieron al azar unas cuantas mujeres en edad fértil y se les hicieron más de 200 preguntas sobre su historial reproductor, sus actitudes y preferencias respecto a la procreación y su conocimiento y uso de los medios anticonceptivos. Se les formuló inclusive preguntas tan delicadas como la frecuencia de sus relaciones sexuales. Se elaboraron también estadísticas sobre la edad, el estado civil, la educación y los enseres domésticos, como receptores (de radio y televisión), con el doble propósito de medir su posición social y económica y observar cualquier influjo que la técnica ejerza en los índices de fecundidad y en el empleo de anticoncepción.

Para comparar los niveles de natalidad de varios países, de grupos de mujeres o de intervalos temporales, los demógrafos calculan el índice de fecundidad total. Este parámetro esta-

BRYANT ROBEY, SHEA O. RUTSTEIN y LEO MORRIS son demógrafos. Robey coordina las actividades internacionales de la Escuela Superior de Higiene y Salud Pública Johns Hopkins. Rutstein, director técnico en la Macro International, Inc., está al frente del Programa de Estudios Demográficos y de la Salud. Morris se ha especializado en demografía hispanoamericana.



1. LOS MEDIOS DE COMUNICACION penetran hasta en las remotas cuevas subterráneas en que viven algunos habitantes de Tunicia. La televisión y la radio pueden emitir espectáculos populares que fomenten la planificación familiar. De este modo han contribuido al descenso de los índices de natalidad. En Tunicia, la natalidad bajó de 6 a 4,3 hijos por mujer entre 1978 y 1988.

dístico se basa en los datos proporcionados por mujeres de 15 a 44 años sobre el número de partos que han tenido. Se computa el valor promedio de nacimientos por año en cada grupo de edad repartida en quinquenios, y la suma de estos valores constituye el índice de fecundidad total. Esta cifra representa el número de hijos que tendría una mujer típica durante su vida fértil si se ajustara a los actuales porcentajes de natalidad.

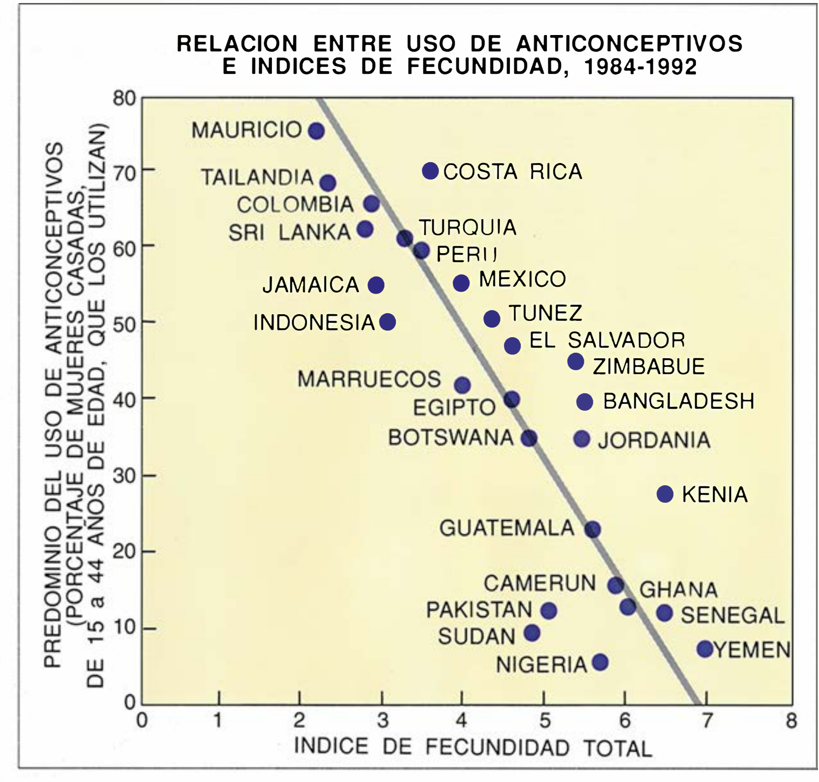
Esas cifras muestran que los índices de fecundidad han declinado drásticamente desde los años setenta. En Tailandia, por ejemplo, la natalidad cayó un 50 % en 12 años: de 4,6 hijos por mujer en 1975 a 2,3 hijos en 1987. En Colombia, ese mismo índice bajó desde un promedio de 4,7 hijos por mujer en 1976 a 2,8 hijos en 1990. En Indonesia, se redujo un 46 % entre 1971 y 1991; en Marruecos, un 31 % entre 1980 y 1992; en Turquía, un 21 % entre 1978 y 1988. En ocho países iberoamericanos y del Caribe las mujeres de hoy tienen una media de un hijo menos que las de hace 20 años.

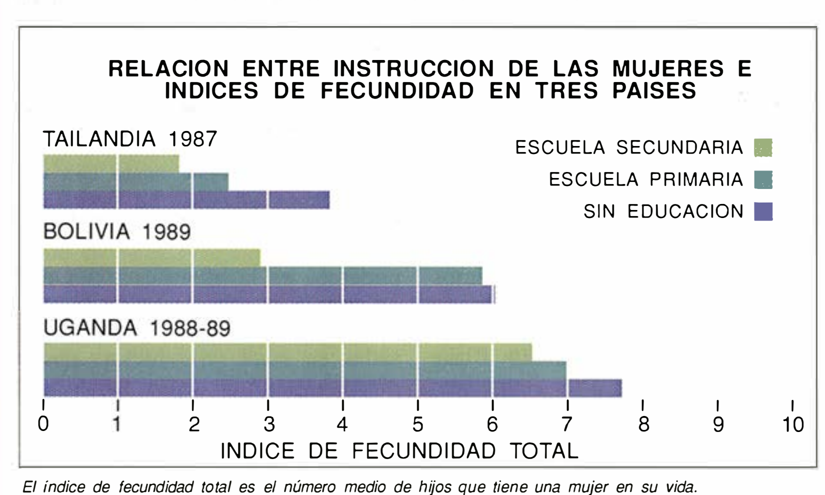
Son muchos los factores, directos e indirectos, que han contribuido a estos cambios. En los años cincuenta, Kingsley Davis y Judith Blake (y más recientemente John Bongaarts) describieron los cuatro elementos principales que influyen en la natalidad, a saber: el recurso a la anticoncepción, la edad del primer matrimonio en las mujeres, el tiempo que, después del parto, la mujer no puede concebir (a causa de la lactancia o de la abstinencia sexual) y la práctica del aborto. La información sobre el papel del aborto en los países subdesarrollados sigue siendo poco fiable. Se sabe que los abortos merman la natalidad, pero a los encuestadores les resulta difícil obtener datos precisos sobre su práctica entre las mujeres, en particular allí donde es ilegal. Según Bongaarts, la educación, la profesión, la salud, la ubicación, la creencia religiosa y la posición social son determinantes indirectos de la natalidad. Porque son indirectos, cuesta más cuantificar su efecto.

De las influencias directas, la más poderosa es la planificación familiar. La cuantía de anticoncepción de un país, es decir, el porcentaje de mujeres casadas en edad reproductora que emplean alguno de estos métodos, determina en gran medida el índice de fecundidad total. Efectivamente, los datos revelan que las diferencias en el predominio de la anticoncepción explican alrededor del 90 por ciento de la variación en los índices de fecundidad. En general, si el empleo de anticonceptivos se incrementa un 15 por ciento, las mujeres tienen, por término medio, un hijo menos. A tenor del muestreo, los niveles de natalidad han bajado de una forma más sensible donde la planificación familiar ha aumentado con mayor notoriedad.

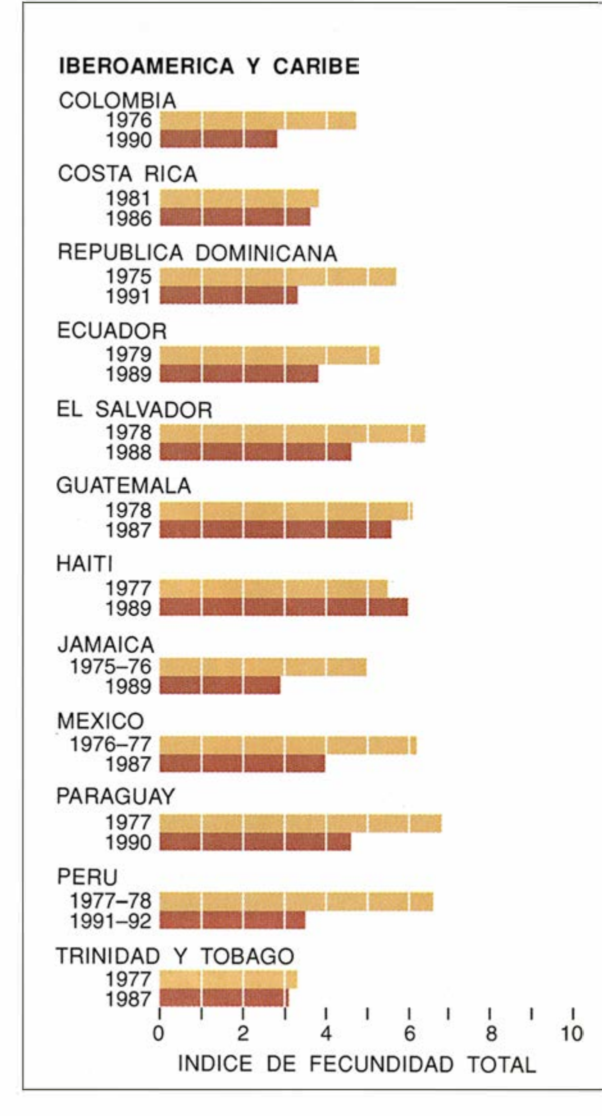
Excluyendo a China, el 38 % de las mujeres casadas en edad fértil de los países en vías de desarrollo practican hoy la planificación familiar: unos 375 millones de mujeres. (Si se incluye China, la cifra asciende a un 51 %.) A modo de comparación, más del 70 % de los matrimonios de casi todos los países industrializados recu-

Indices de fecundidad y su relación con la educación y el





El índice de fecundidad total es el número medio de hijos que tiene una mujer en su vida.



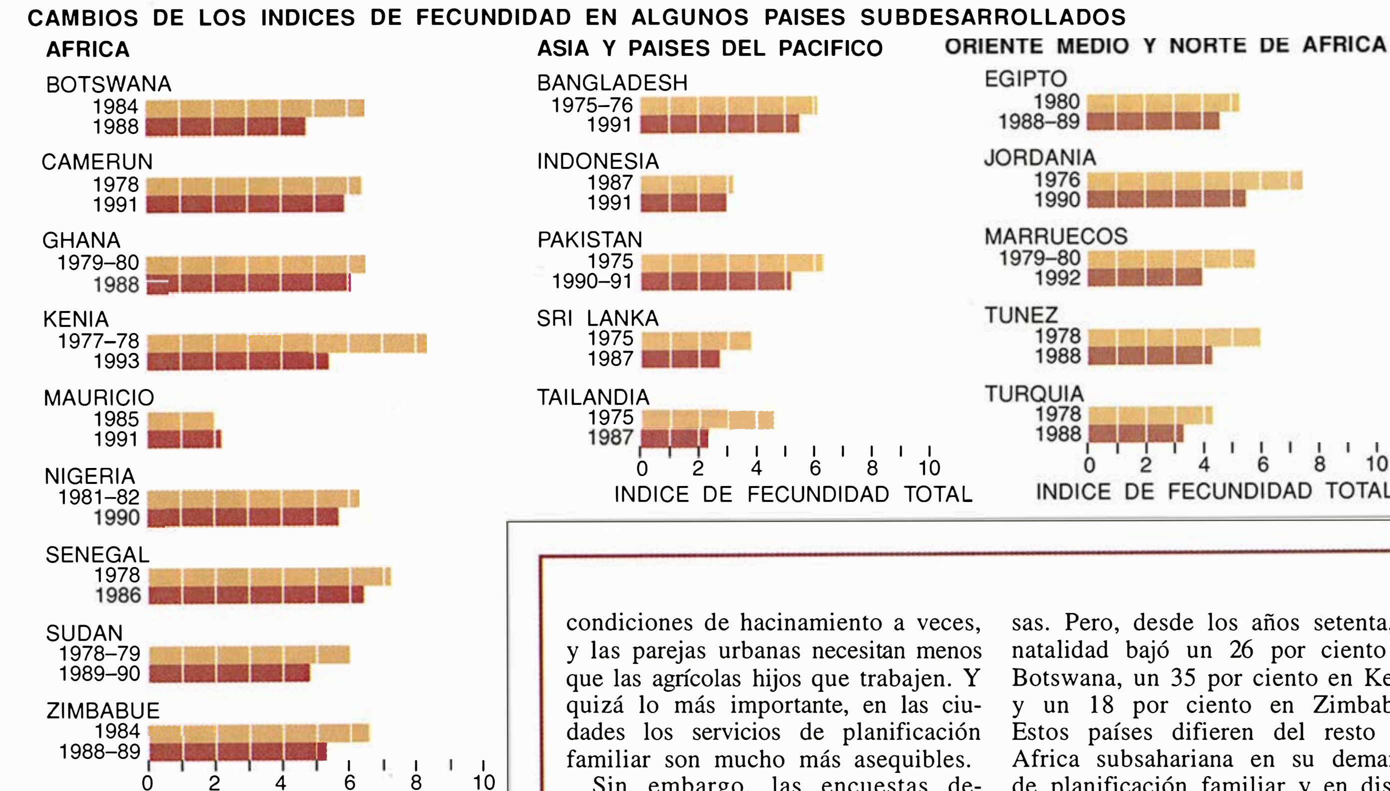
rren a métodos anticonceptivos. Y en el Japón y algunos países de Europa occidental el índice de fecundidad total se está aproximando, o es ya inferior, al nivel de sustitución de 2,1 hijos por pareja, índice al que la población dejará finalmente de aumentar.

A medida que se ha difundido por el Tercer Mundo el acceso a las nuevas formas de anticoncepción, ha ido disminuyendo la probabilidad de que las parejas dependan de los métodos tradicionales como la abstinencia periódica (el método del ritmo) y la unión no consumada. Entre los países estudiados, los métodos tradicionales son predominantes sólo en cuatro naciones africanas en las que se hace muy poco uso de cualquier método anticonceptivo y cuya natalidad es alta: Burundi, Camerún, Ghana y Togo. En Bolivia, dependen del método del ritmo el 17 por ciento de las mujeres casadas, cifra mayor que la de las mujeres que practican métodos artificiales.

Hoy día el 80 por ciento de las mujeres casadas del Tercer Mundo que recurren a la anticoncepción emplean métodos recientes. Según las encuestas, la esterilización femenina voluntaria es el procedimiento de planificación familiar más común. La esterilización predomina en toda Iberoamérica y en el Caribe, y es el método preferido en nueve de los 16 países encuestados. La esterilización voluntaria es también el procedimiento empleado en la India, en tanto que en China es el segundo, con escasa diferencia respecto al dispositivo intrauterino (DIU). En Iberoamérica muchas mujeres eligen la esterilización porque, a poco de casarse, alcanzan el tamaño familiar que desean: las parejas tienen un promedio de tres o cuatro hijos y, por lo general, no espacian mucho los nacimientos. La esterilización es rara en los países de Africa y del Oriente Medio que han sido objeto de estudio.

Pese a la epidemia del sida, sólo alrededor del 4 por ciento de las parejas casadas en edad reproductora de los países subdesarrollados utilizan preservativos como método de planificación. Aunque los datos de que se dispone son limitados, parece que su empleo va aumentando, tal vez en

control de la natalidad en algunos países en vías de desarrollo



respuesta al sida, particularmente entre los no casados. Se ha elaborado un plan de futuras encuestas para recabar información acerca de la influencia de esta pandemia sobre la planificación familiar, la natalidad y la mortalidad.

Los descubrimientos recientes abonan la idea de que la provisión de métodos de control de la natalidad es el factor que más y de manera más directa influye en los índices de fecundidad. Por otra parte, los datos confirman observaciones anteriores según las cuales es más probable la anticoncepción entre las mujeres con cierta cultura que entre las mujeres poco o nada instruidas. Los resultados ponen de manifiesto la mayor probabilidad de prácticas anticonceptivas entre las mujeres que viven en zonas urbanas que entre las habitantes de zonas rurales del mismo país. Las mujeres de las ciudades suelen estar mejor informadas que las campesinas y más influidas por las actitudes contemporáneas, entre las que destaca el deseo de un menor número de hijos. El mantenimiento de los hijos también es en general más costoso en las ciudades, donde se vive en peores condiciones de hacinamiento a veces, y las parejas urbanas necesitan menos que las agrícolas hijos que trabajen. Y quizá lo más importante, en las ciudades los servicios de planificación familiar son mucho más asequibles.

Sin embargo, las encuestas demuestran también que tener educación o vivir en una ciudad no es requisito imprescindible para la anticoncepción. En países donde ha aumentado la accesibilidad general a los métodos de control y se ha difundido el interés por familias menos numerosas, la natalidad ha declinado considerablemente entre mujeres campesinas y menos instruidas. En Colombia, el descenso de la natalidad en la década de los ochenta debióse al creciente uso de los servicios de planificación por las mujeres menos instruidas. En Indonesia, donde el programa gubernamental de planificación familiar ha intentado llegar a todas las parejas, la natalidad ha descendido en todos los sectores sociales con más uniformidad que en muchos otros países. Durante las dos últimas décadas se ha ido generalizando en la población el uso de la anticoncepción en la mayor parte del mundo subdesarrollado, y se han acortado las distancias relativas al predominio de planificación familiar según el nivel de educación.

Los cambios evidenciados en los índices de tres países subsaharianos ilustran la nueva tendencia. Antes de conocerse los datos, muchos expertos dudaban de que el Africa subsahariana pudiera sumarse pronto a la revolución reproductora. Las creencias tradicionales y los sistemas de parentesco favorecían las familias numerosas. Pero, desde los años setenta, la natalidad bajó un 26 por ciento en Botswana, un 35 por ciento en Kenia y un 18 por ciento en Zimbabue. Estos países difieren del resto del Africa subsahariana en su demanda de planificación familiar y en disponibilidad de la misma.

Pese a estas diferencias, Botswana, Kenia y Zimbabue podrían representar la vanguardia, no la excepción. En Kenia, la cultura propicia las familias numerosas. Los primeros intentos de promover la planificación prosperaron poco. Pero cuando el rápido auge de la población empezó a presionar la agricultura y a henchir las ciudades, disminuyó el interés por la prole numerosa. La educación y la dignificación del estatuto social de la mujer contribuyeron también a cambiar la mentalidad respecto al tamaño de la familia. Al mismo tiempo, los compromisos asumidos por el gobierno keniata y por organizaciones de ayuda han permitido que el país satisfaga la demanda de anticoncepción: entre 1984 y 1989 aumentó su uso un 59 % y el número de hijos deseados disminuyó un 24 %. La natalidad cayó un 16 %.

Las actitudes tradicionales y la posición social de las mujeres están cambiando por doquier en el Africa subsahariana. Incluso allí donde se usa poco la anticoncepción, las mujeres instruidas ya no consideran que una gran prole vaya a elevar su posición social y económica o que el destino determine el número de hijos. Las mujeres se casan más tarde: aunque las subsaharianas suelen hacerlo antes que las de otros sitios, la

edad de su primer matrimonio se ha retrasado en los países encuestados durante los últimos 20 años. En muchos países africanos las pautas culturales siguen siendo muy distintas de las asiáticas o las iberoamericanas, y la poliginia es aún una práctica muy extendida; pero esas pautas están cambiando.

Las mujeres instruidas y urbanas del Africa subsahariana están empezando a practicar la planificación de la familia. En Níger el 16 por ciento de las mujeres que viven en las ciudades acuden a ese servicio, en comparación con el 3 por ciento de las campesinas. En Nigeria, país con más de 90 millones de habitantes, las encuestas reflejan un aumento de la anticoncepción desde el 6 por ciento en 1990 hasta más del 11 por ciento en 1992.

Aunque la mayoría de las africanas aseguran a los encuestadores que desean familias numerosas, muestran también interés por espaciar los nacimientos. En el Africa subsahariana estudiada, entre un cuarto y un tercio de las mujeres quieren esperar al menos dos años de un parto a otro, lo que da a entender que la anticoncepción se generalizaría si los gobiernos se lo propusieran.

Fuera del Africa subsahariana están ocurriendo cambios decisivos. Al menos la mitad de las mujeres de 16 de los 22 países afirmaron no querer más hijos. El número de mujeres casadas que opinan de este modo ha aumentado casi en todas partes. Esta cifra ha resultado ser un buen factor de predicción a corto plazo de la evolución de los índices de fecundidad. Charles Westoff pronosticó en 1991 que, de acuerdo con las encuestas, en 1996 los índices de fecundidad habrán descendido alrededor de un 13 por ciento en Iberoamérica y de un 10 por ciento en Africa.

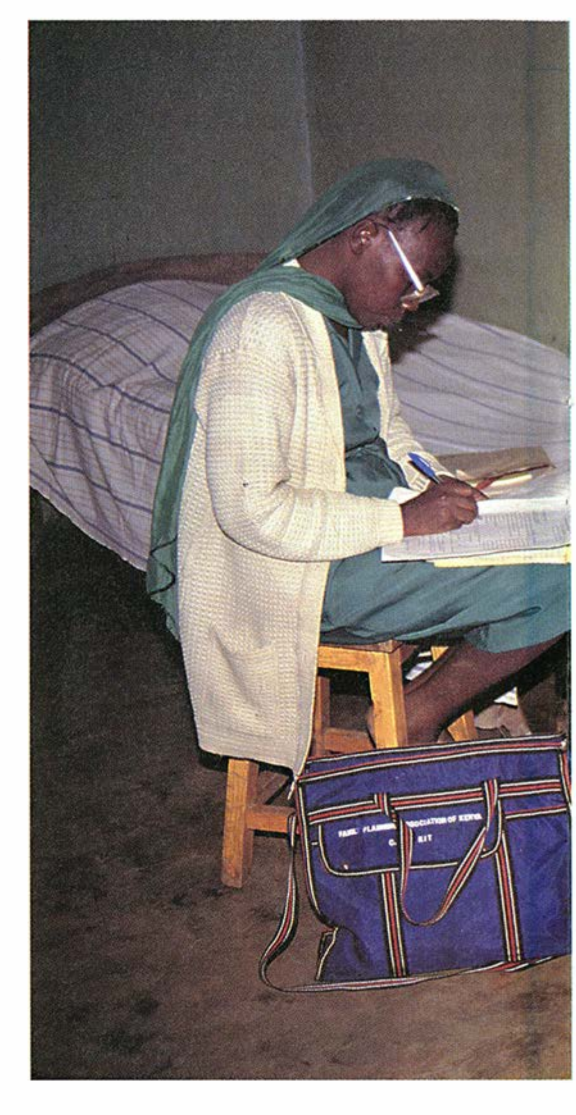
La caída de la natalidad en esos países difiere de la ocurrida en los países industrializados hace unas cuantas generaciones. Para explicar el gran declive de la natalidad europea que se produjo poco más o menos al siglo de la Revolución Industrial, los sociólogos crearon la noción de transición demográfica: a medida que mejoraban las condiciones de vida y avanzaba la ciencia médica en la Europa del siglo XIX fueron disminuyendo los índices de mortalidad. Como consecuencia, la población aumentó, impulsando la emigración. Por fin, ya empezado el siglo XX, se redujeron los índices de natalidad, con lo que se frenó el aumento de población.

La teoría de la transición demográfica refleja este patrón: las sociedades se caracterizan, en un comienzo, por una natalidad y mortalidad elevadas. Esta fase en que la población no aumenta precede a un estadio intermedio, cuando comienza la modernización y se reduce la mortalidad, aunque la natalidad sigue siendo alta; tras un período de crecimiento demográfico rápido, decae la natalidad. La última fase, de crecimiento estable de la población, baja mortalidad y baja natalidad, define al mundo desarrollado.

El reciente descenso de los índices de fecundidad en los países subdesarrollados no encaja en ese marco teórico, ni por lo que respecta al ritmo ni por las circunstancias. La tasa de natalidad ha caído en estos países mucho más deprisa que durante la transición demográfica europea. Hasta en países pobres a los que apenas ha llegado el desarrollo han echado raíces las nuevas actitudes, y cada vez son más las parejas con familias menos numerosas. La natalidad declinó en los años ochenta, al estancarse o hundirse muchas economías que se estaban desarrollando.

Los datos ponen en cuestión el aforismo según el cual “no hay mejor anticonceptivo que el desarrollo”, acuñado en la Conferencia sobre la Población Mundial celebrada en Bucarest en 1974. Pues bien, Bangladesh es un contraejemplo perfecto de la tesis. Se trata de uno de los países más pobres del mundo y con más tradición agrícola; con alta mortalidad infantil, ínfima posición social de la mujer y una mayoría de familias que dependen del trabajo de los niños para vivir. Pese a todo, los índices de fecundidad bajaron un 21 % entre los años 1970 y 1991: de siete a 5,5 niños por mujer. Durante el mismo período, el uso de anticoncepción entre las mujeres casadas en edad reproductora subió del 3 al 40 %.

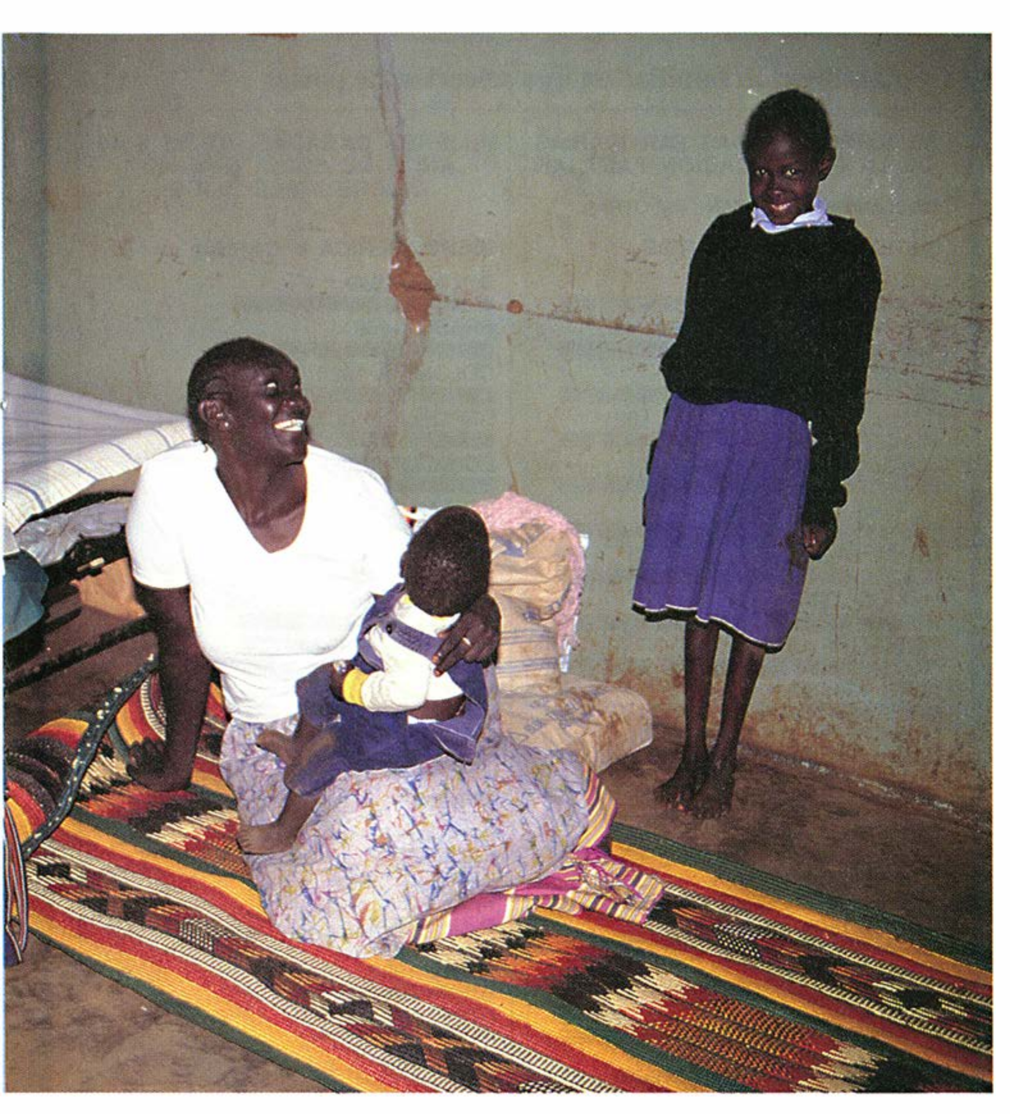
La razón de que la tasa de natalidad de los países en vías de desarrollo descienda de una forma muy distinta del curso seguido en Europa estriba en la forma diferente de plantearse la planificación. Durante la transición demográfica occidental, no se habían inventado los modernos anticonceptivos, y la propia idea de una planificación familiar tardó en aceptarse. Quienes propugnaban la anticoncepción corrían el riesgo de ser reprimidos; cuando Margaret Sanger, partidaria del control de la natalidad, abrió una clínica en Brooklyn en 1916, fue detenida por alteración del orden público. El bajo nivel de formación y el limitado alcance de los medios de comunicación condicionaron la lenta propagación de los métodos.



El fácil acceso a los anticonceptivos confiere hoy a los países subdesarrollados una ventaja fundamental sobre las sociedades europeas que experimentaron los descensos de la fertilidad en otro momento. Antes de la aparición de los métodos modernos, la mayoría de los europeos recurría a la abstinencia, la unión no consumada o al aborto para controlar el número de hijos. En algunos países, sobre todo en la Europa oriental, las parejas se refugian todavía en tales prácticas, al escasear allí la oferta de formas nuevas de control de la natalidad.

Con la introducción de la píldora, los dispositivos intrauterinos (DIU), los inyectables y la esterilización, gobiernos y organizaciones de ayuda han venido promoviendo campañas de planificación y uso de los métodos anticonceptivos.

Los medios de comunicación, con su enorme influjo, han acelerado la propagación de las nuevas ideas so-



2. CENTRO DE PLANIFICACION familiar en Kenia. Esas instituciones han hecho asequibles el control de la natalidad y los servicios médicos. Según datos de 1993, el 33 por ciento de las mujeres casadas usan anticonceptivos, mientras que en 1989 sólo los empleaban el 27 por ciento.

bre la planificación familiar, lo mismo en ambientes urbanos que en los rurales. Millones de personas tienen hoy acceso directo e instantáneo al resto del mundo gracias a la radio y a la televisión. Analizando las encuestas hechas en Ghana y en Kenia se advierte que las campañas de los medios de comunicación han conformado las decisiones de las mujeres sobre el número de hijos. Westoff y Germán Rodríguez llegaron a la conclusión de que las mujeres keniatas que escuchaban o veían mensajes a favor de la planificación familiar en la radio o la televisión mostraban una mayor propensión a tener menos hijos. Encuestas similares de Nigeria, Gambia y Zimbabue han corroborado esa tendencia. El equipo de Phyllis T. Piotrow halló que, en Nigeria, tres populares concursos de entretenimiento que incluían mensajes sobre planificación familiar duplicaron, y en una ciudad cuadruplicaron, el número de visitas a los centros de planificación. Es una estrategia que están copiando varios países subdesarrollados.

La mayor disponibilidad y la promoción de los métodos de planifiación han permitido, a las parejas, el control del tamaño de su familia con mayor eficacia de lo que podían conseguirlo diez o veinte años atrás. Estas condiciones prepararon el marco para la caída brusca de la tasa de natalidad en las dos últimas décadas. En la mayoría de los países en vías de desarrollo, la chispa que cambió los afanes de familias numerosas no vino de la modernización, sino de las graves recesiones económicas de las postrimerías de los setenta e inicios de los ochenta. Muchas familias cayeron entonces en la cuenta de que su nivel de vida estaba bajando. En respuesta a ello, las parejas decidieron limitar el número de hijos o aplazar el nacimiento del siguiente. No parece verosímil que la tendencia se invierta.

Así, en Tailandia, Indonesia, Colombia, Kenia y en otras muchas naciones del Tercer Mundo, la generalizada adopción de los métodos de planificación y la diseminación de las nuevas ideas han hecho que la natalidad disminuya con tal rapidez, que quizá sea más exacto hablar de una revolución reproductora que de una transición demográfica.

Nuestra revisión de los datos sugiere que, si bien el desarrollo y el cambio social crean las condiciones favorables para la reducción familiar, los anticonceptivos constituyen el camino más eficaz. Los estudios llevados a cabo por W. Parker Mauldin y John Ross indican que, con independencia de los cambios sociales y económicos, los programas de planificación desempeñaron un importante papel en la caída de la natalidad en los países subdesarrollados de 1975 a 1990. Uno de nosotros (Rutstein) ha demostrado que los cambios en el uso de anticonceptivos y en la natalidad dependen tanto de lo que un país se esfuerce en promover la planificación como de su desarrollo económico.

Además, se destaca cada vez con más insistencia que la difusión de diferentes actitudes y valores es una poderosa fuerza impulsora del declinar de la natalidad. Este "cambio de mentalidad" al que suelen referirse John Cleland y Christopher Wilson explicaría el 50 por ciento que ha descendido la natalidad en Tailandia entre 1970 y 1980. La mayoría de los tailandeses comparten una cultura común, abierta al cambio, y muchas de sus zonas rurales están vinculadas a la economía nacional. El cambio de ideas sobre el control de la natalidad, así como las mayores posibilidades de acceso a la educación, el empleo y los bienes de consumo, llegaron en seguida hasta las regiones más apartadas, contribuyendo a generar una demanda de planificación familiar. El programa nacional tailandés de planificación fomentó y logró satisfacer esa creciente demanda.

Aunque la natalidad va en declive, no está claro, en líneas generales, cuándo llegará todo el mundo subdesarrollado a alcanzar el mismo nivel de práctica anticonceptiva que han alcanzado ya unos pocos países del Tercer Mundo y el mundo industrializado. Las parejas tienen, por término medio, menos hijos que sus padres, pero el número de mujeres en edad reproductora sigue aumentando. En los países más poblados, como India, la natalidad rebasa con mucho el nivel de sustitución. La población



Matrimonio, hijos y planificación familiar en una selección de países
CASADAS ANTES DE LOS 20 AÑOS
HOY ENTRE 40 y 44 AÑOS
HOY ENTRE 20 y 24 AÑOS
IBEROAMERICA Y CARIBE
BOLIVIA 1989
BRASIL 1986
COLOMBIA 1990
REPUBLICA DOMINICANA 1991
ECUADOR 1987
EL SALVADOR 1985
GUATEMALA 1987
MEXICO 1987
PARAGUAY 1990
PERU 1991-92
TRINIDAD Y TOBAGO 1987
AFRICA
BOTSWANA 1988
BURUNDI 1987
GHANA 1988
KENIA 1989
LIBERIA 1986
MALI 1987
NIGERIA 1990
SUDAN 1989-90
TOGO 1988
UGANDA 1988-89
ZIMBABUE 1988-89
ASIA Y EL PACIFICO
INDONESIA 1987
PAKISTAN 1990-91
SRI LANKA 1987
TAILANDIA 1987
ORIENTE MEDIO Y N. DE AFRICA
EGIPTO 1988-89
JORDANIA 1990
MARRUECOS 1987
TUNEZ 1988
0 20 40 60 80 100
POR CIENTO
MUJERES CASADAS PARTIDARIAS DE LA PLANIFICACION FAMILIAR
USAN
DESEARIAN
OTRAS
IBEROAMERICA Y CARIBE
BOLIVIA 1989
BRASIL 1986
COLOMBIA 1990
REPUBLICA DOMINICANA 1991
ECUADOR 1987
EL SALVADOR 1985
GUATEMALA 1987
MEXICO 1987
PARAGUAY 1990
PERU 1991-92
TRINIDAD Y TOBAGO 1987
AFRICA
BOTSWANA 1988
BURUNDI 1987
GHANA 1988
KENIA 1989
LIBERIA 1986
MALI 1987
NIGERIA 1990
SUDAN 1989-90
TOGO 1988
UGANDA 1988-89
ZIMBABUE 1988-89
ASIA Y EL PACIFICO
INDONESIA 1987
PAKISTAN 1990-91
SRI LANKA 1987
TAILANDIA 1987
ORIENTE MEDIO Y N. DE AFRICA
EGIPTO 1988-89
JORDANIA 1990
MARRUECOS 1987
TUNEZ 1988
0 20 40 60 80 100
POR CIENTO
MUJERES CASADAS, DE 15 a 44 AÑOS DE EDAD, QUE NO QUIEREN MAS HIJOS
IBEROAMERICA Y CARIBE
BOLIVIA 1989
BRASIL 1986
COLOMBIA 1990
REPUBLICA DOMINICANA 1991
ECUADOR 1989
EL SALVADOR 1988
GUATEMALA 1987
MEXICO 1987
PARAGUAY 1990
PERU 1991-92
TRINIDAD Y TOBAGO 1987
AFRICA
BOTSWANA 1988
BURUNDI 1987
GHANA 1988
KENIA 1993
LIBERIA 1986
MALI 1987
NIGERIA 1990
SUDAN 1989-90
TOGO 1988
UGANDA 1988-89
ZIMBABUE 1988-89
ASIA Y EL PACIFICO
INDONESIA 1987
PAKISTAN 1990-91
SRI LANKA 1987
TAILANDIA 1987
ORIENTE MEDIO Y N. DE AFRICA
EGIPTO 1988-89
JORDANIA 1990
MARRUECOS 1987
TUNEZ 1988
0 20 40 60 80 100
POR CIENTO



3. RETRASO EN LA EDAD en que se contrae matrimonio, un fenómeno creciente en muchos países de Asia —como en Singapur, donde se casó esta pareja— y en todo el mundo en vías de desarrollo. El casarse más tarde favorece la caída de la natalidad. Sin embargo, en algunos sitios siguen siendo comunes las bodas entre adolescentes.

mundial sigue aumentando rápidamente. Para que la natalidad bajase a niveles que mitigaran sustancialmente los índices de crecimiento de la población, una fracción aún mayor de la población tendría que recurrir a métodos anticonceptivos.

Es muy probable que el ritmo al que siga decreciendo la natalidad dependa de tres factores interrelacionados: la velocidad de desarrollo de las sociedades; la rapidez con que se acepten las nuevas normas relativas a las familias menos numerosas y al uso de la planificación familiar; y, tal vez el más importante de todos, la medida en que los programas públicos y el mercado consigan satisfacer la necesidad de anticoncepción. La demanda de planificación familiar sobrepasa ya con mucho su oferta. En los países encuestados, entre un 20 y un 30 % de las mujeres casadas no usan anticoncepción, aun cuando quieren evitar el embarazo. Se dice que estas mujeres tienen una necesidad insatisfecha, o una demanda insatisfecha, de planificación familiar.

Los cálculos varían, pero los demógrafos coinciden en que en muchos países hay una sustancial demanda insatisfecha de planificación familiar. Según Richard Blackburn son más de 120 millones las mujeres casadas y en edad reproductora que no toman las medidas idóneas aunque declaran en las encuestas su deseo de evitar el embarazo. Esta cifra se basa en una extrapolación de los datos de 50 países en vías de desarrollo al resto de países en su misma situación económica, ponderada por tamaño de población. La cantidad equivale a más de una mujer de cada cinco del Tercer Mundo, excluyendo China. (Se supone que en China no hay esta necesidad insatisfecha, dada la disponibilidad general de anticonceptivos y la política gubernamental de familias de un solo hijo.)

Fuera del Africa subsahariana, a excepción de Haití y Pakistán, en todos los países la mayoría de las mujeres casadas en edad fértil practican la planificación familiar o desean hacerlo. En Asia e Iberoamérica se está empezando ya a satisfacer casi toda la demanda de planificación familiar. Pero en 14 países africanos encuestados se satisface actualmente menos de la mitad de su necesidad potencial. De hecho, en la mayoría de los países subsaharianos se satisface menos de un tercio de la potencial demanda de planificación familiar, y menos de una quinta parte en Liberia, Malí y Uganda. La mayor demanda insatisfecha se encuentra en las zonas rurales, donde no llegan los medios anticonceptivos.

Si se satisficiera toda la demanda de planificación familiar, el uso de anticonceptivos en los países subdesarrollados subiría del 51 por ciento a más del 60 por ciento. Un aumento así haría que la natalidad bajase de la actual media de cuatro hijos por mujer a tres, en opinión de Steven Sinding. Según nuestros cálculos este descenso reduciría el índice de crecimiento de la población en el Tercer Mundo (excluyendo China) del 2,3 por ciento anual al 1,6 por ciento. Un índice de crecimiento anual del 1,6 por ciento significaría que la población correspondiente sería de 5100 millones en el año 2025, en vez de 6500 millones.

Costaría unos 2400 millones de dólares al año que los programas y los medios de planificación llegasen a los 120 millones de mujeres cuya demanda potencial permanece insatisfecha. Según el Fondo de Poblaciones de las Naciones Unidas, los gastos anuales totales en la planificación familiar, sumando los gastos de las parejas, los de los gobiernos de los países en vías de desarrollo y los de los organismos de ayuda, ascienden a 4500 millones de dólares.

Aun suponiendo que el porcentaje de mujeres que usan métodos de planificación no aumente, en el año 2000 habrá que servir a 100 millones más de parejas que las atendidas ahora, simplemente porque el número de mujeres en edad fertil está aumentando a resultas de la natalidad de la generación anterior. A medida que sigan difundiéndose las actitudes favorables a crear familias menos numerosas, la demanda de servicios de planificación y, por consiguiente, el coste de satisfacerla aumentarán aún más.

Como se desprende de los datos demográficos, en los países en vías de desarrollo ha aparecido una clara tendencia hacia la planificación. Sería lamentable que los programas y los recursos financieros no respondieran a los enormes cambios en las actitudes reproductoras que se han observado en muchos países del Tercer Mundo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

UNMET NEED AND THE DEMAND FOR FAMILY PLANNING. Charles F. Westoff y Luis H. Ochoa en *DHS Comparative Studies*, nº 5. Institute for Resource Development, Columbia, Md., 1991.

KNOWLEDGE AND USE OF CONTRACEPTION. Naomi Rutenberg, Mohamed Ayad, Luis H. Ochoa y Marilyn Wilkinson en *DHS Comparative Studies*, nº 6. Institute for Resource Development, Columbia, Md., 1991.

THE REPRODUCTIVE REVOLUTION: NEW SURVEY FINDINGS. Bryant Robey, Shea O. Rutstein, Leo Morris y Richard Blackburn en *Population reports*, Serie M, número 11. Johns Hopkins University, diciembre 1992.

Observatorio Compton de rayos gamma

El flujo constante de datos procedentes de este observatorio espacial retrata un cosmos dinámico y, a menudo, enigmático

Neil Gehrels, Carl E. Fichtel, Gerald J. Fishman, James D. Kurfess y Volker Schönfelder

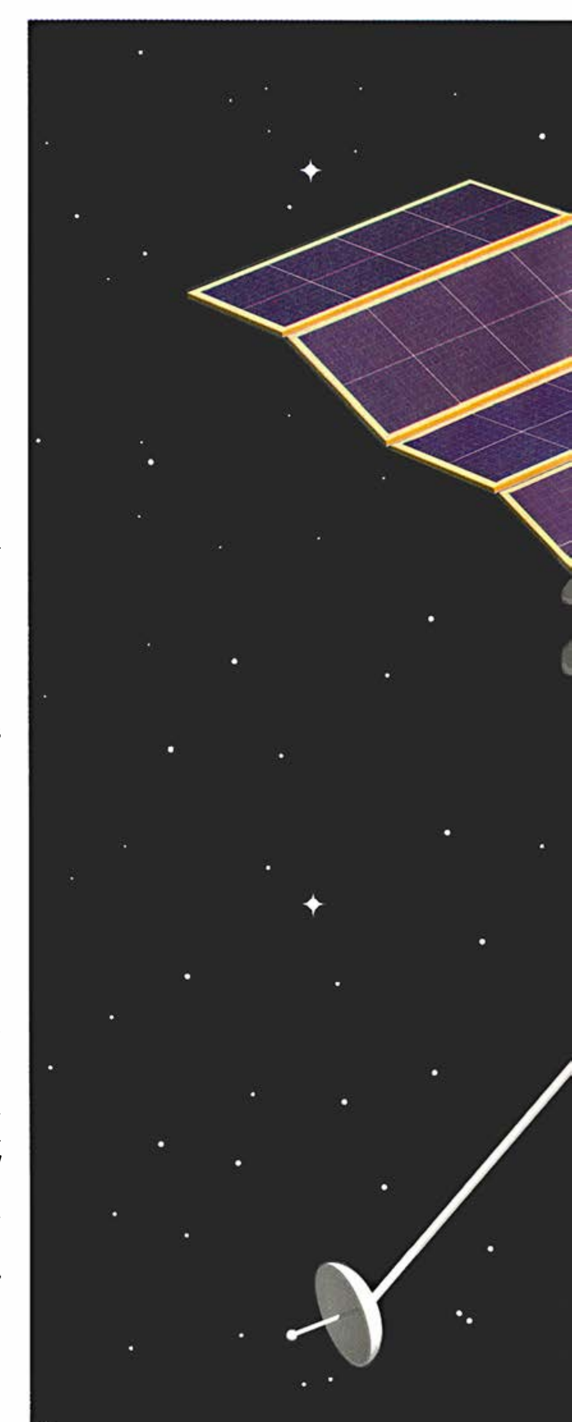
El 5 de abril de 1991 el transbordador espacial *Atlantis* despegó del Centro Espacial Kennedy. Llevaba consigo el *Observatorio Compton de rayos gamma.* Desde entonces, este satélite de 16 toneladas de peso ha venido realizando rastreos exhaustivos de los rayos gamma celestes, la radiación del extremo más energético del espectro. A esas frecuencias aparece un universo voluble y dinámico. El *Compton* apunta hacia algunos de los fenómenos más violentos del cosmos: explosiones catastróficas de supernovas, cuásares remotos que expulsan chorros de gas cuyo brillo deja pequeño al de galaxias enteras y ráfagas de rayos gamma cuyo origen ignoramos. Los primeros descubrimientos del *Compton*, impresionantes, socavan nociones muy arraigadas sobre la naturaleza de todos esos fenómenos.

Este rosario de sorpresas y hallazgos se debe a que los ojos de rayos gamma del *Compton* exploran territorios casi vírgenes. La astronomía clásica ha dependido exclusivamente de las observaciones en el visible, que no es sino una minúscula porción del espectro electromagnético. La luz visible tiene longitudes de onda de entre 4000 y 7000 angstroms; la energía que transportan los fotones de esa franja es de dos a tres electronvolts. La atmósfera terrestre absorbe todas las formas de radiación más energética, de los rayos del ultravioleta lejano (por encima de 10 electronvolts) a los gamma (de 10.000 a billones de electronvoltios).

NEILS GEHRELS, CARL E. FICHTEL, GERALD J. FISHMAN, JAMES D. KURFESS y VOLKER SCHÖNFELDER colaboran en la recogida y análisis de datos procedentes del *Observatorio Compton de rayos gamma.* Gehrels, del Centro Goddard de Vuelos Espaciales, está al frente del *Compton.* Fichtel, del Laboratorio Goddard, se responsabiliza del EGRET, un instrumento a bordo del *Compton.* Fishman dirige el equipo del Centro de Vuelo Espacial George C. Marshall que diseñó y construyó el experimento BATSE. Kurfess, del Laboratorio de Investigación Naval, tiene a su cargo el OSSE. Schönfelder, investigador principal del instrumento COMPTEL, pertenece al Instituto Max Planck de Física Extraterrestre en Garching.

En su pretensión por aprehender los rayos gamma celestes, los astrónomos han ido elaborando durante los últimos veinte años instrumentos que viajan a bordo de satélites o globos de gran altitud, más allá de la atmósfera terrestre. El *Observatorio Compton* es la culminación del proceso. A diferencia de misiones anteriores, detecta fotones en un amplio margen de energías —desde los 30.000 a los 30.000 millones de electronvolts—, gracias a lo cual puede dar cuenta de los objetos que emiten rayos gamma. El *Compton* es el primer satélite capaz de cartografiar el cielo en su totalidad para esas frecuencias, y, lo que es aún más importante, los instrumentos que lleva en sus entrañas decuplican la sensibilidad de anteriores detectores de rayos gamma y cuentan con mejor resolución angular y temporal.

El satélite porta cuatro instrumentos complementarios. Operan en rangos energéticos diferentes, aunque solapados; cada instrumento se ocupa de determinados tipos de observación. El "experimento de fuentes efímeras y pulsos" (BATSE: *Burst and Transient Source Experiment*) estudia fenómenos de corta duración; por ejemplo, pulsos de rayos gamma y fulguraciones solares. Al "experimen-



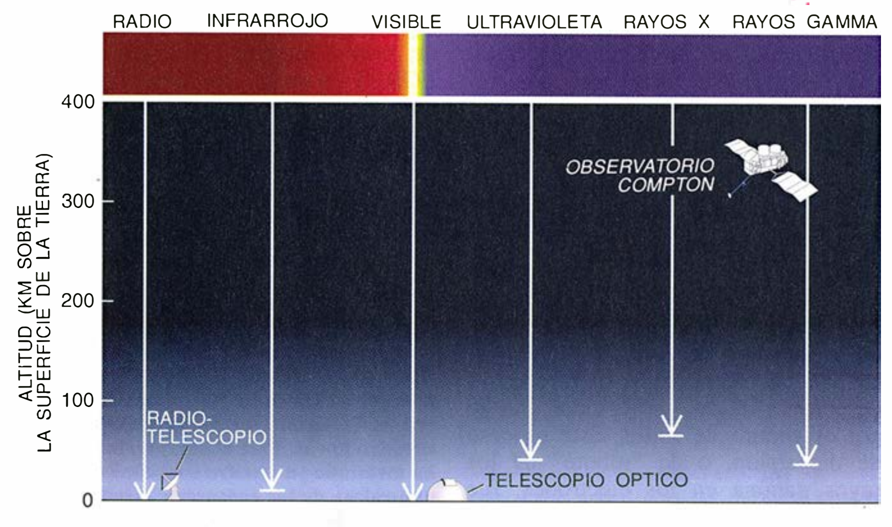
to del espectrómetro de centelleos orientado" (OSSE: *Oriented Scintillation Spectrometer Experiment*) compete medir el espectro de rayos gamma de baja energía de diversos objetos celestes. El "telescopio Compton de formación de imágenes" (COMPTEL: *Imaging Compton Telescope*) recoge los espectros de fuentes que emiten rayos gamma de energía intermedia y crea imágenes. Por último, el "telescopio del experimento de rayos gamma de gran energía" (EGRET: *Energetic Gamma Ray Experiment Telescope*) capta los rayos gamma más energéticos.

Los rayos gamma no pueden enfocarse ni se reflejan como la luz. Al *Compton* le sobran, pues, lentes y espejos. En cambio, los cuatro instrumentos se valen de la tecnología al uso en la física de altas energías. BATSE y OSSE incorporan detectores de yoduro de sodio; cuando un rayo gamma atraviesa esta sustancia, excita sus moléculas y provoca que emitan un destello de luz visible, que se registra electrónicamente. COMPTEL detecta los rayos gamma de alta energía por medio de una capa de un líquido especial que cubre otra superficie de cristal de yoduro de sodio. El instrumento registra los rayos gamma dispersos en el detector líquido, absorbidos luego por el yoduro de sodio. Este proceso de dispersión, o de "rebote" de los rayos gamma en los electrones, fue descubierto en los años veinte por Arthur Holly Compton.

Para poder captar los rayos gamma de mayor energía, la ingeniería del EGRET es única: contiene numerosas capas de redes de metal fino electrizadas, llamadas cámaras de chispas. Los rayos incidentes producen pares de electrones y positrones (antimateria gemela a los electrones) que ge-

1. OBSERVATORIO COMPTON de rayos gamma: el primer satélite que observa exhaustivamente los rayos gamma que emanan de fuentes celestes. A unos 400 kilómetros sobre la superficie de la Tierra, el *Compton* escruta durante las veinticuatro horas. Este observatorio espacial ha mejorado ya nuestro conocimiento de la naturaleza de los cuásares y puesto en entredicho las hipótesis sobre los objetos que causan los pulsos de rayos gamma.





2. EL ESPECTRO ELECTROMAGNETICO va de las débiles ondas de radio hasta los rayos gamma de gran energía. La luz visible ocupa sólo una pequeña porción del espectro. La mayoría de los rayos electromagnéticos, los gamma inclusive, son absorbidos por átomos y moléculas en las zonas más altas de la atmósfera terrestre. Por ello, la observación de los rayos gamma requiere que se lleven instrumentos adecuados más allá de la atmósfera mediante cohetes de sondeo, globos de gran altitud y satélites que orbitan la Tierra.

neran cortocircuitos entre los hilos de las redes. Las chispas trazan el camino seguido por el rayo gamma. Un detector de yoduro de sodio situado en la parte inferior del instrumento recoge los electrones y positrones y mide su energía.

Tres de los cuatro instrumentos del *Compton* observan franjas muy anchas del cielo; para apuntarlos a sus objetivos se gira el satélite. BATSE consta de ocho unidades, situadas en cada una de las esquinas del *Compton*, que barren la mitad del cielo que la Tierra no oculta. COMPTEL ve un trozo de cielo circular de 64 grados de ancho; el EGRET tiene un campo de visión algo menor, de 45 grados. OSSE, por su parte, rastrea una zona pequeña, de 4 por 11 grados; es capaz de apuntar hacia una fuente de rayos gamma o desviarse de ella muy deprisa, lo que permite que se sustraiga de la señal de la fuente el ruido de fondo que captan sus detectores.

El ritmo con que se reciben los fotones gamma procedentes de las fuentes celestes es ínfimo, si se compara con el flujo de fotones de luz visible. Por esa razón, el *Compton* tiene que realizar barridos de larga duración para obtener mediciones significativas de los rayos gamma. En un período de observación típico, el observatorio permanece apuntado en la misma dirección durante unas dos semanas; COMPTEL y EGRET recogen en ese tiempo datos sobre una región del cielo y BATSE escruta continuamente los rayos gamma que vienen de todas las direcciones.

A 400 kilómetros de la superficie terrestre, el *Compton* completa una órbita cada 92 minutos; la Tierra oculta parte del cielo durante la mitad, más o menos, de ese ciclo. Debido a que el OSSE se apunta independientemente de los otros instrumentos, puede cambiar de objeto y observar una segunda fuente cuando la primera esté oculta por la Tierra.

Desde su lanzamiento, hace dos años y medio, el *Compton* se ha convertido en la cornucopia de los descubrimientos astronómicos. Sus observaciones más apasionantes son las de los pulsos intensos de radiación gamma de corta vida, o erupciones de rayos gamma, cuya naturaleza está aún por resolver; no obstante constituir uno de los objetos más notorios del cielo de rayos gamma, nadie sabe qué son, dónde están ubicados o a qué se debe su estallido.

Las erupciones de rayos gamma fueron descubiertas a finales de los años sesenta por el grupo de Ray W. Klebesadel, del Laboratorio Nacional de Los Alamos, gracias a los detectores instalados a bordo de los *Vela*, satélites diseñados para captar destellos de rayos gamma producidos por detonaciones nucleares. Descubrieron erupciones de rayos gamma cortas y potentes, cuyo origen estaba en el cielo, no en la Tierra; se producían alrededor de una docena de veces al año, en direcciones que parecían ser aleatorias, dispersas por todo el cielo. Cuando los datos tomados por los *Vela* se hicieron públicos en 1973, los astrónomos se aprestaron a determinar la causa de tales pulsos.

Las erupciones son tan difíciles de entender porque, en cuanto terminan, desaparecen sin dejar rastro detectable de estrella o cualquier otro objeto estable. Cuando los telescopios ópticos apuntan hacia una erupción, sólo ven una porción de cielo normal, carente de objetos peculiares. Ocurre, además, que las erupciones no se parecen entre sí. Su duración va de una centésima de segundo a 1000 segundos, y su brillo varía en un factor de hasta 100.000. Las más intensas superan durante algunos instantes el brillo del resto de fuentes de rayos gamma del cielo juntas, pero es imposible determinar la luminosidad intrínseca de una erupción si no se sabe la distancia a que se encuentra.

Antes del lanzamiento del *Compton*, se había llegado a una explicación verosímil acerca del origen de las erupciones; serían el resultado de sacudidas sísmicas, explosiones o impactos de asteroides en la superficie de estrellas de neutrones. Estos restos estelares colapsados tienen aproximadamente la misma masa que el Sol, pero sólo miden 20 kilómetros de ancho. Es casi imposible detectar las estrellas de neutrones frías y viejas con telescopios ópticos. Sin embargo, la gravedad de su superficie es tan fuerte que hasta una leve sacudida podría desencadenar una brillante erupción de rayos gamma.

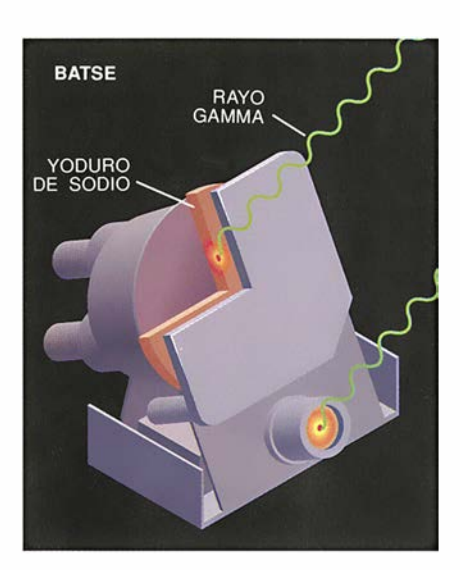
Había un modo muy sencillo de verificar este modelo. Las estrellas de neutrones, como la mayoría de las estrellas de nuestra galaxia, tienden a esconderse en el disco aplastado que constituye el grueso de la Vía Láctea. Por consiguiente, las explosiones deberían acumularse en el cielo a lo largo del plano de la Vía Láctea. Las primeras medidas parecían seguir una distribución más uniforme que ésa, pero muchos atribuyeron ese resultado a la escasa sensibilidad de los primeros detectores de rayos gamma. El BATSE, instrumento de calidad muy superior, fue diseñado para detectar erupciones más debiles y distantes. Se esperaba que, como hacen las estrellas tenues de la Vía Láctea, las erupciones más débiles que captase el BATSE perfilaran el disco de nuestra galaxia.

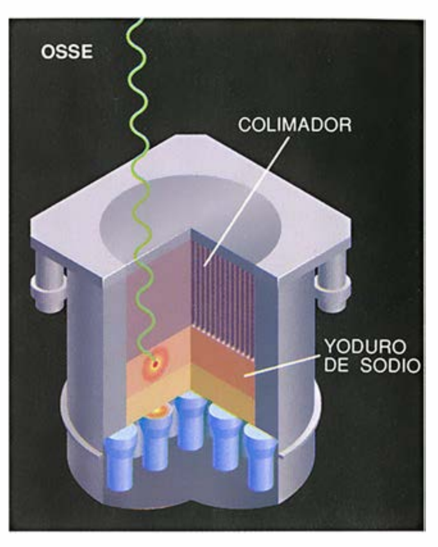
Pero el detector ha echado por tierra las expectativas. A lo largo de los dos últimos años ha registrado, en promedio, una erupción por día, distribuidas uniformemente por el cielo. Las erupciones no muestran indicio alguno de concentrarse a lo largo del disco o en cualquier otra dirección. Al propio tiempo, el BATSE ha descubierto una pauta clara en el brillo de las erupciones y, por consiguiente, en las distancias a las que tienen lugar.

Si los objetos que emiten los pulsos estuvieran dispersos de manera uniforme por el espacio, el número de erupciones tenues habría de ser mayor, sistemáticamente, que el de erupciones brillantes. La relación entre brillo y número de erupciones depende del fenómeno siguiente: el brillo aparente de una explosión disminuye con el cuadrado de la distancia, en tanto que el volumen del cielo que aloja las fuentes de las erupciones aumenta con el cubo de la misma. BATSE descubrió que el número de erupciones tenues desciende mucho más deprisa de lo que, según esa relación, cabría esperar. La sorprendente conclusión es que el satélite está viendo el borde de la población de erupciones; la escasez de erupciones débiles se debe, simplemente, a que muy pocas se producen más allá de ese límite.

De la conjunción de los dos descubrimientos clave del BATSE se infiere que la Tierra está en el centro de una acumulación esférica de fuentes de pulsos que se extiende sólo hasta una distancia finita. Pero, ¿qué objetos celestes podrían distribuirse así? Los teóricos han propuesto varias explicaciones, un tanto exóticas, para interpretar los resultados del BATSE. Para algunos, las explosiones se deben a colisiones entre cometas, o a otros fenómenos localizados justo más allá de los planetas del sistema solar, mas no parece muy factible el mecanismo por el cual las colisiones de cometas generarían rayos gamma. Otra posibilidad, de mayor aceptación, es que las erupciones tengan lugar en estrellas de neutrones ubicadas no en el disco de la galaxia, sino en un enorme halo exterior. Pero los modelos de este tipo requieren artificiosas suposiciones *ad hoc* acerca del tamaño y la forma del halo. Además, si fuese así, ¿por qué las estrellas de neutrones del disco galáctico no producen un número apreciable de erupciones?

Ciertas hipótesis más interesantes sostienen que las erupciones de rayos gamma se originan en los lugares más remotos del cosmos, quizá cuando se funden dos estrellas de neutrones que orbitan una alrededor de la otra o en el instante en que una estrella de neutrones es devorada por un agujero negro. En estos modelos, el "borde" de la distribución de erupciones es el del finito universo visible. Si fuese cierto que las erupciones se producen en galaxias remotas, se contarían entre los fenómenos de mayor energía de cuantos ocurren en el universo.

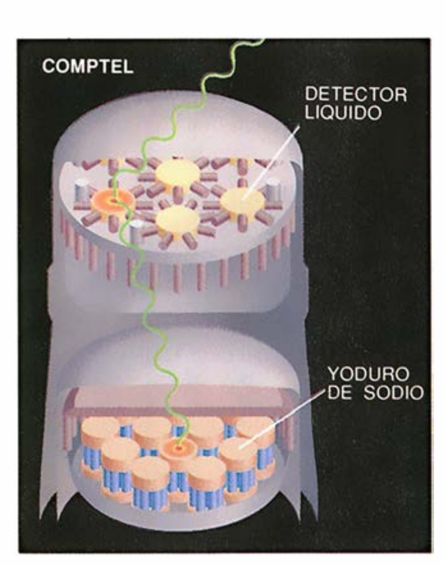


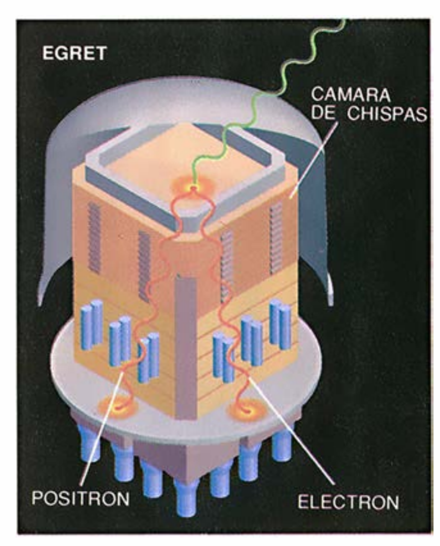


3. LOS DETECTORES DE RAYOS GAMMA suelen ir provistos de cristales de yoduro de sodio, material que emite un destello de luz cuando recibe el impacto de un rayo gamma. Sensibles tubos fotomultiplicadores y fotodetectores recogen esa luz e indican que se ha observado un rayo gamma. El BATSE (*izquierda*) consta de ocho detectores que recogen rayos gamma procedentes de todo el cielo. El instrumento OSSE (*derecha*) contiene un colimador de tungsteno y un blindaje de yoduro de sodio que sólo le deja observar una pequeña zona del cielo.

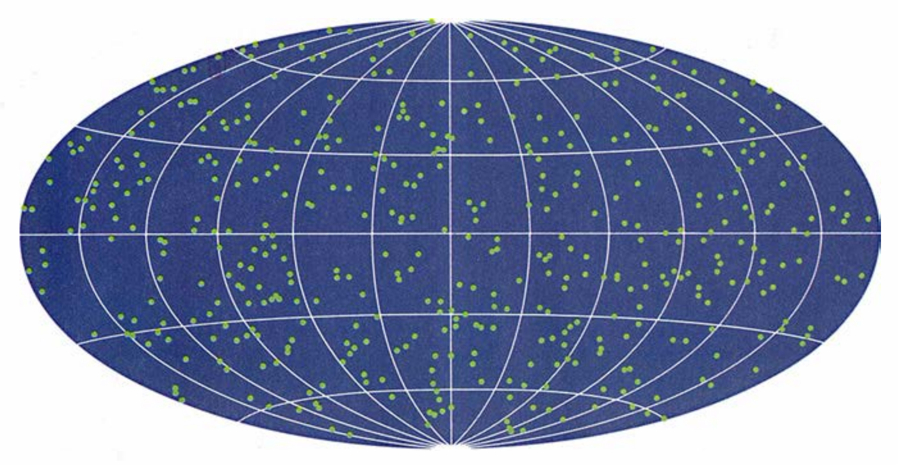
Los astrónomos se dividen a partes casi iguales entre la hipótesis del halo galáctico y la cosmológica. Sólo una pequeña minoría sitúan las explosiones en las puertas del sistema solar. Las nuevas detecciones que cabe esperar realice el BATSE durante los próximos años podrían finalmente desvelar el verdadero carácter de estos enigmáticos objetos. Hay también muchos que se afanan en buscar destellos de luz visible que sean simultáneos a las erupciones. Bastaría quizá una sola observación así para descartar uno de los modelos en liza.

El *Compton* ha oscurecido aún más el misterio de las erupciones de rayos gamma, pero ha aclarado otros fenómenos celestes. Así, conocemos mejor la naturaleza de los núcleos activos, fuentes de energía compactas y brillantes que se esconden en el centro de algunas galaxias. Alrededor de un 1 por ciento de las galaxias presentan núcleos activos, pero hasta un 30 por





4. EL INSTRUMENTO COMPTEL (*izquierda*) utiliza dos conjuntos de detectores para captar rayos gamma. Un rayo gamma entrante choca con un electrón en el detector líquido situado en la parte superior y, desviado, sigue hasta el bloque de yoduro de sodio, donde es absorbido. En ambos detectores el rayo gamma produce un destello de luz, que se registra. En el instrumento EGRET (*derecha*), los rayos gamma de mayor energía crean pares de electrones y positrones. Estas partículas producen cortocircuitos en una serie de rejillas electrizadas, o cámaras de chispas, antes de depositar su energía en un cristal de yoduro de sodio.

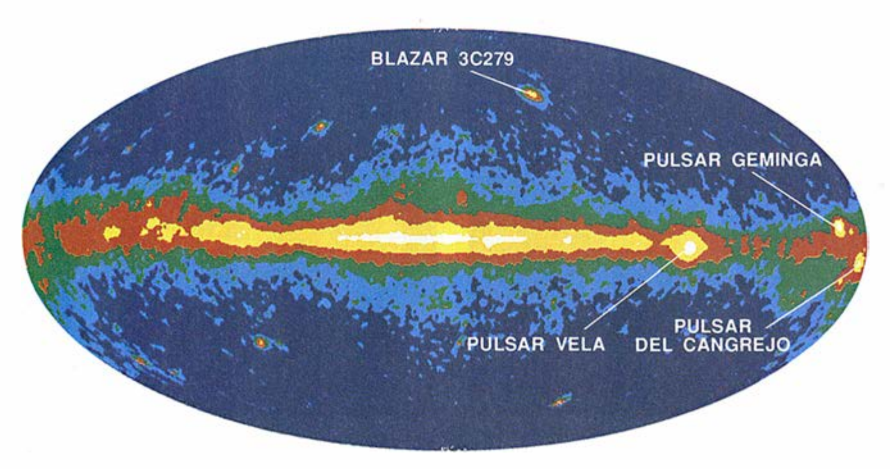


5. PULSOS DE RAYOS GAMMA (*puntos verdes*). Tapizan el cielo, según los capta el BATSE. Los pulsos no se concentran, pues, en el plano de la Vía Láctea (*línea horizontal central*), ni en otra galaxia o cúmulo de galaxias. Se reparten uniformemente en todas las direcciones, quizá porque tienen lugar en galaxias muy lejanas.

ciento es el porcentaje de las que muestran indicios de que en sus centros hay zonas activas. En el caso de los cuásares (que figuran entre los núcleos activos galácticos más luminosos), una región sólo algo mayor que nuestro sistema solar brilla mucho más que toda la galaxia que la circunda.

La mayoría de los astrónomos cree que son agujeros negros de masa extraordinariamente grande —objetos colapsados que contendrían entre millones y miles de millones de veces la masa del Sol— los causantes de las fuertes emanaciones de energía procedentes de los núcleos activos galácticos. La fuerza gravitatoria del agujero negro atrae a las estrellas cercanas y las hace pedazos. Antes de que desaparezca en el interior del agujero negro, la materia desmenuzada forma un disco que se calienta en extremo; su gas despide cantidades enormes de radiación electromagnética, desde ondas de radio, de baja energía, hasta rayos gamma. En algunos casos, salen disparadas del disco partículas elementales (electrones, positrones) en chorros estrechos confinados magnéticamente, casi a la velocidad de la luz. Estas partículas emiten radiación, lo que hace que los chorros puedan detectarse. Cuando los haces apuntan hacia la Tierra, se dice que el objeto es un blázar (*blazar* en inglés, de la palabra *blaze*, resplandecer).

Los núcleos activos galácticos se clasifican en dos grupos básicos: los que son potentes fuentes de emisión en radio y los que no lo son. En general, las fuentes con fuerte emisión en radio residen en galaxias elípticas y las de escasa emisión pertenecen a un tipo de galaxias espirales activas conocidas como galaxias Seyfert.



6. MAPA DEL CIELO DE RAYOS GAMMA, producido por el EGRET. Muestra que el continuo resplandor de rayos gamma tiene mayor brillo a lo largo del plano de la Vía Láctea. La emisión difusa se origina principalmente por las interacciones energéticas entre los rayos cósmicos y los átomos y partículas esparcidos entre las estrellas. También pueden apreciarse algunos púlsares cercanos y cuásares distantes. El color blanco representa la mayor intensidad, y el azul oscuro, la menor.

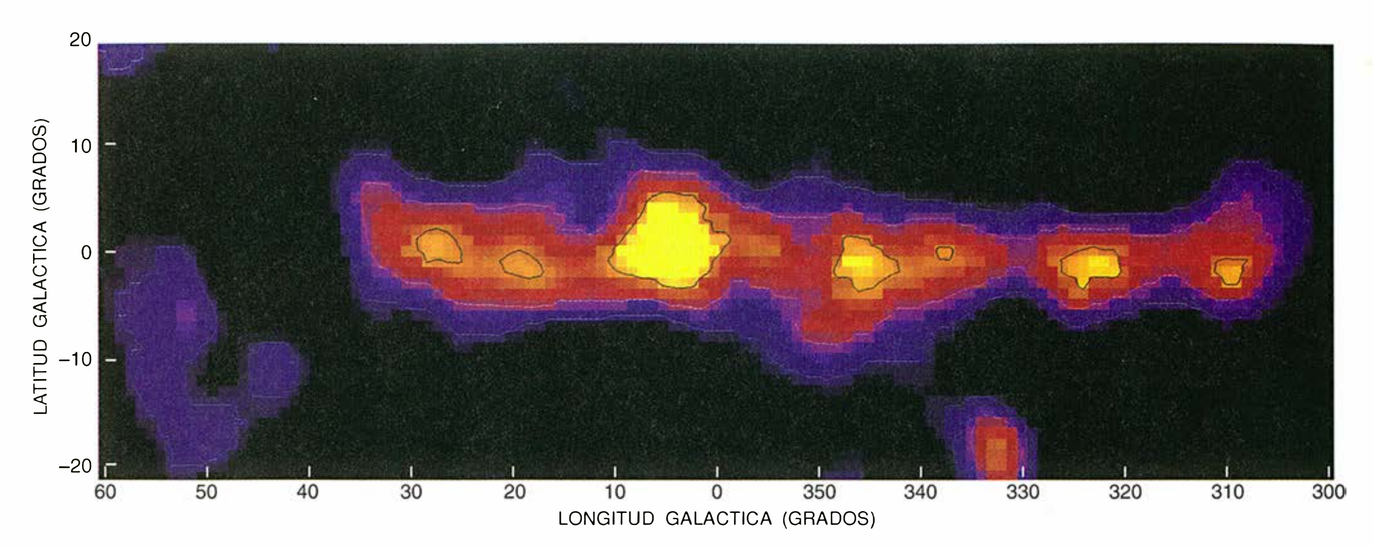
El *Compton* ha revelado que las emisiones de rayos gamma de ambos tipos de núcleos activos tienen características muy diferentes. OSSE y COMPTEL han hallado que la emisión de rayos gamma procedente de las galaxias Seyfert se interrumpe a energías superiores a los 100.000 electronvolts. En claro contraste, EGRET ha descubierto que muchos blázares con fuerte emisión de radio brillan hasta alcanzar las energías más altas que registra el instrumento. El EGRET ha hecho también que los científicos sientan de nuevo hasta qué punto es grande la cantidad de energía que irradian estos objetos.

El EGRET detectó sus dos primeros blázares en junio de 1991: 3C273, a 1800 millones de años luz de la Tierra, y 3C279, que en el cielo está muy cerca de 3C273 pero dista de nosotros 4600 millones de años luz. Sorprendentemente, 3C279 era con mucho el más brillante de los dos. Pese a su lejanía, es una de las fuentes más luminosas del cielo de rayos gamma de alta energía; para alcanzar tamaña luminosidad, este blázar debe emitir miles de veces tanta energía, en forma de rayos gamma, como la Vía Láctea en todo el espectro.

Durante dos semanas de junio de 1991, EGRET observó que el brillo de 3C279 aumentaba hasta un factor dos para, a continuación, descender en un factor cuatro en sólo dos días. Una variabilidad tan rápida indica que el tamaño de la región donde se originan los rayos gamma es muy pequeño. Está claro que se propagó por la región emisora una alteración de sus parámetros físicos, causando un cambio de consideración en su emisión de rayos gamma en tan sólo unos días. A partir de este dato se puede inferir que el ancho de la región que alberga la fuente es de algunos días luz.

Desde entonces, el EGRET ha detectado 26 núcleos activos de galaxias emisores de rayos gamma. En su inmensa mayoría se trata de blázares y se encuentran a distancias comprendidas entre los 400 millones y los 9000 millones de años luz. Los más lejanos se encuentran en el límite visible del universo (que en este artículo presuponemos que se halla a 13.000 millones de años luz).

La explicación más plausible de por qué los blázares son fuentes tan poderosas de rayos gamma es que éstos se originan en chorros que apuntan hacia la Tierra, donde multitud de fotones de baja energía chocan con los electrones que se mueven a altas ve-



7. HAY NUCLEOS RADIACTIVOS de aluminio 26 por toda la Vía Láctea. Se piensa que este elemento se origina sobre todo en las explosiones de supernova, donde las rápidas reacciones nucleares generan una gran diversidad de núcleos atómicos pesados. Cuando el aluminio 26 decae, emite rayos gamma de una energía peculiar, la representada en esta imagen del COMPTEL. Los grumos más brillantes muestran concentraciones inesperadas de núcleos recientemente sintetizados, que se añaden a la prevista concentración a lo largo del plano galáctico.

locidades. Los fotones adquieren suficiente energía para convertirse en rayos gamma y alinearse con las partículas que conforman el haz. Debido a que la radiación resultante se concentra a lo largo de un haz estrecho, si éste apunta a la Tierra el blázar se nos aparecerá como un objeto luminosísimo. Durante años se ha venido conjeturando que los haces desempeñan un papel fundamental en las emisiones procedentes de algunos núcleos activos de galaxias; los resultados del EGRET abonan esta hipótesis.

Otro fenómeno que enciende el cielo de rayos gamma es el de las supernovas, esas explosiones catastróficas que marcan el final de la vida de las estrellas de gran masa. Las explosiones de supernova han tenido mucho peso en la evolución química del universo. Según el modelo cosmológico de la gran explosión, en un principio el universo estaba compuesto sólo por hidrógeno y helio. El resto de los elementos —incluidos el carbono de nuestro cuerpo y el silicio y el hierro de nuestro planeta— fueron creados por reacciones de fusión nuclear en el interior de las estrellas. Las supernovas ofrecen el mecanismo primario por el que estos elementos se reciclan en el espacio interestelar, donde se incorporan a la siguiente generación de estrellas y, seguramente, de planetas. Las estrellas estables no crean elementos, el oro, por ejemplo, que sean más pesados que el hierro; estos átomos sólo se forman a las temperaturas y densidades extremas de una explosión de supernova.

El 23 de febrero de 1987 los astrónomos tuvieron una oportunidad inigualable para ampliar su conocimiento del proceso por el que las supernovas forman nuevos elementos. Ese día, la supernova 1987A hizo explosión en la Gran Nube de Magallanes, una de las galaxias satélites de la Vía Láctea. Ha sido la más cercana y brillante observada en la Tierra desde que se inventó el telescopio. Era una estrella azul, cuya masa multiplicaba por 20 la solar. Durante la explosión, una serie de reacciones nucleares produjeron núcleos radiactivos raros, de corta vida, y otros elementos pesados más estables. Algunos de estos núcleos radiactivos emiten, cuando se desintegran, rayos gamma con energías características. Los de más fácil detección son los que emiten el cobalto 56 (que al desintegrarse se convierte en hierro 56) y el cobalto 57 (que viene a dar en hierro 57). La supernova produce una nube de gas en expansión que absorbe la mayor parte de esos rayos; tras varias dispersiones, puede que acaben emergiendo como luz visible.

Ya antes de 1987A, Donald D. Clayton, Stirling A. Colgate y Stanford E. Woosley, entre otros teóricos, habían reflexionado sobre el papel de los isótopos radiactivos en las explosiones de supernova. Algunos señalaron que la desintegración radiactiva podía constituir la fuente primaria de energía gracias a la cual la supernova en expansión permanece visible; otros adujeron que algunos de los rayos gamma generados por la radiactividad podrían atravesar la nube formada por los restos de la explosión y ser detectables directamente.

La observación de la supernova 1987A confirmó la predicción. El cobalto 56 tiene una vida media de 77 días; de 1987 a 1990 la luz visible de la supernova disminuyó a exactamente ese ritmo. El satélite *Misión del Máximo Solar* y los instrumentos instalados en globos de la NASA también detectaron rayos gamma, procedentes de la supernova, con energías de 847.000 y 1.238.000 electronvolts, que son las energías asociadas a la desintegración del cobalto 56.

Desde 1991, la luz visible de la supernova 1987A ha venido disminuyendo a un ritmo que correspondería a una vida media de unos 270 días: exactamente la vida media del cobalto 57. Parece que éste es ahora el isótopo radiactivo que en mayor medida da energía a la supernova. El OSSE ha continuado las observaciones precedentes con la detección de rayos gamma de 122.000 electronvolts, que son característicos de la desintegración del cobalto 57. Al comparar las intensidades de la emisión en rayos gamma de las dos formas de cobalto se halla la proporción relativa en que se crearon el níquel 57 y el níquel 56 durante la explosión de la supernova. La proporción medida en la supernova se acerca a la medida en el Sol. Esta coincidencia constituye una rotunda confirmación de que las supernovas producen la mayor parte de los elementos pesados que se pueden encontrar en el Sol y en todo el universo.

Otros elementos radiactivos generados por las explosiones de supernovas tienen vidas mucho más largas que el cobalto. El aluminio 26, isótopo

radiactivo bastante abundante, tiene una vida media de 716.000 años. Las explosiones de supernovas ocurren en la Vía Láctea una vez cada 30 años, de donde se sigue que debe haber, dispersado por toda nuestra galaxia, aluminio 26 originado por 24.000 supernovas (716.000 dividido por 30).

La astronomía de rayos gamma localiza el aluminio 26 y, por consiguiente, los sitios donde se están sintetizando elementos nuevos. También crean aluminio 26 las explosiones, menos poderosas, de novas, y ciertas estrellas violentamente activas. Este isótopo, cuando decae, produce rayos gamma con energías de 511.000 y 1.809.00 electronvolts (y también de otras energías). El *Compton* puede trazar un mapa con los lugares, a lo largo de la franja de la Vía Láctea, donde se originan esos rayos, y de la intensidad de éstos. El poder de penetración de los rayos gamma es tan increíble que se abren paso sin dificultad a través del gas y el polvo que impiden la toma de imágenes ópticas de la galaxia; el *Compton* puede, pues, detectar todo el aluminio 26 de la galaxia.

El COMPTEL realizó un mapa detallado del aluminio 26 de la galaxia. De acuerdo con lo esperado, se concentra a lo largo de la Vía Láctea, como la mayoría de las estrellas y las supernovas. Pero nos sorprendió que el mapa estuviese moteado por puntos brillantes, separados por regiones intermedias donde se emiten menos rayos gamma. No se sabe qué son esos puntos brillantes; quizá se trate de regiones donde la formación de estrellas es intensa, de restos de supernovas cercanas o de algún otro fenómeno que no acertamos a imaginar.

Esta representación cartográfica del aluminio 26 y otras más precisas que seguirán se convertirán en el mapa de carreteras galáctico de la astrofísica de altas energías. El COMPTEL acaba de añadirle otro detalle al cuadro con la observación de los rayos gamma procedentes de Casiopea A, el remanente de una supernova que explotó en 1668. Parece haber detectado la señal característica de los rayos gamma del titanio 44, cuya vida media es de 54 años. Centrándose en esa radiación específica, quizá descubra el *Compton* otras supernovas recientes que estén ocultas por nubes de gas o polvo.

Los rayos gamma de 511.000 electronvolts relacionados con la desintegración del cobalto 56 y el aluminio 26 tienen un origen peculiar. Su nacimiento se remonta a los positrones que se eyectan cuando se desintegra uno de esos isótopos. Cuando un positrón se topa con un electrón se aniquilan uno y otro, y se convierten en energía pura en forma de radiación gamma (este aniquilamiento es la prueba definitiva del famoso principio de Albert Einstein que dice que la masa se puede transformar en energía según dicta la ecuación $E = mc^2$).

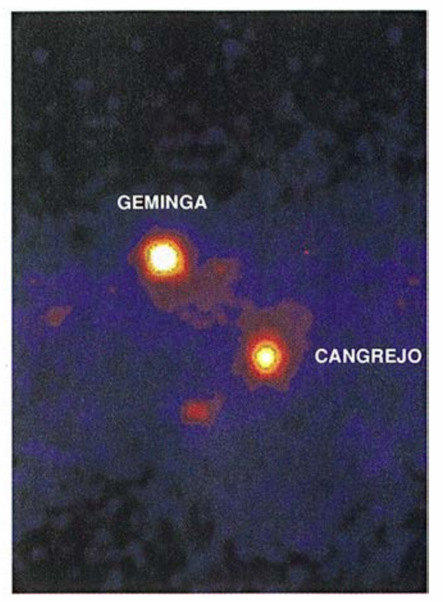
El OSSE ha detectado un intenso flujo de rayos gamma de 511.000 electronvolts procedente de la región central de la Vía Láctea. Estamos convencidos de que es producto de la aniquilación de electrones y positrones, pero ignoramos de qué tipo son los objetos que producen los positrones. Quizás una parte de estos fotones venga de los elementos radiactivos generados en los remanentes de supernova que hay dispersos por las regiones interiores de la galaxia. Se ha defendido que parte de la radiación resultante de la aniquilación proviene de una o más fuentes discretas, posiblemente de agujeros negros con masa estelar. Los mapas de alta resolución que muestran la distribución de esta radiación en la Vía Láctea deberían ayudar a desvelar el origen de estos rayos gamma.

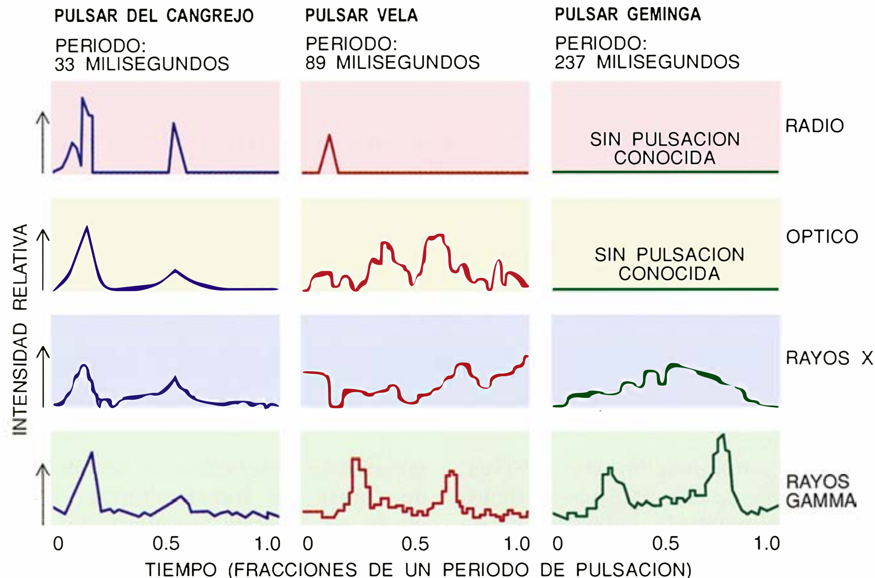
El *Compton* ha elucidado otro aspecto de las secuelas de una explosión de supernova. La mayor parte de la estrella que estalló se expande hacia afuera convertida en nube radiactiva; en cambio, el núcleo de hierro implosiona y se transforma en una estrella compacta de neutrones o, en casos muy extremos, un agujero negro. Por lo general, las estrellas de neutrones están hechas de materia nuclear, carente de espacios vacíos; una cucharadita del material de una estrella de neutrones pesaría más de mil millones de toneladas. Cuando el núcleo se contrae, su ritmo de rotación se acelera muchísimo debido a la conservación del momento angular. La estrella de neutrones girará cientos de veces por segundo; se contrae tanto el viejo núcleo que la fuerza de su campo de gravedad aumenta de forma drástica y llega a ser billones de veces más fuerte que el de la Tierra.

Con su rapidísima rotación, las es-



8. EL BLAZAR 3C279 (*izquierda*) destaca, pese a que se encuentra a cinco mil millones de años luz de distancia, en la imagen tomada por el EGRET (3C273 es un blázar más cercano, pero más débil). Los cuásares extraen su energía del gas que cae hacia agujeros negros cuyas masas son millones o miles de millones de veces la del Sol (*derecha*). Los chorros de partículas cargadas perpendiculares al disco de gas pueden originar haces brillantes y estrechos de rayos gamma.





9. LOS DESTELLOS DE RADIACION emanan de púlsares, masas estelares de tan sólo 20 kilómetros de diámetro y muy rápida rotación. Los púlsares jóvenes brillan intensamente a energías de rayos gamma (*izquierda*). Los gráficos (*derecha*) muestran variaciones en el brillo de los púlsares para diferentes regiones del espectro electromagnético. Algunos púlsares están sincronizados en todas las zonas del espectro y otros no; Geminga escapa a la detección de los radiotelescopios.

trellas de neutrones actúan a modo de aceleradores gigantes de partículas. Las partículas subatómicas, dotadas de carga eléctrica, que queden atrapadas en el campo magnético de la estrella alcanzarán velocidades cercanas a la de la luz y originarán conos de radiación que rotarán con la estrella. Cuando los conos pasen por la Tierra, se verá a la estrella de neutrones encenderse y apagarse. Esta actividad intermitente de las estrellas de neutrones fue detectada en 1967, cuando Anthony Hewish y Jocelyn Bell descubrieron fuentes de radio que emitían pulsos muy rápidos y regulares, y así se las llamó "radiopúlsares". Más tarde se vio que también hay púlsares de energías mucho mayores.

De los 500 radiopúlsares conocidos, sólo Vela y Cangrejo fueron detectados a energías de rayos gamma por instrumentos anteriores al *Compton*. Desde su lanzamiento, éste ha dado con otros cuatro púlsares de rayos gamma: Circinus, PSR 1706-44, PSR 1055-52 y Geminga (los números se refieren a sus coordenadas en el cielo).

A menudo se analizan los púlsares mediante la comparación de sus curvas de luz en diferentes partes del espectro electromagnético. Las curvas de luz muestran la variación del brillo de un púlsar en el curso de una de sus rotaciones. Si nos fijamos en las curvas de luz de los seis púlsares de rayos gamma conocidos, percibiremos que cada uno presenta una emisión con características propias. El Cangrejo, por ejemplo, emite dos pulsos en cada rotación; los pulsos tienen lugar de forma sincronizada en muchos rangos de energía; Vela obedece a diferentes patrones según la energía a que lo observemos. Uno y otro exhiben pulsos en el visible, pero sólo ellos lo hacen. Geminga, el más excéntrico, emite intensa radiación en rayos gamma, pero los radiotelescopios no lo detectan.

Quizá Geminga sea el primer púlsar de un nuevo grupo, el de los que no presentan pulsos en radio. Estamos revisando los datos del *Compton* en busca de algún indicio que pruebe la existencia de otros púlsares de rayos gamma similares a él. El silencio de Geminga en radio podría indicar que su haz de radioemisión se concentra en un cono más estrecho que el de su haz de rayos gamma de modo que los pulsos no barren la Tierra cuando la estrella gira. El *Compton* ha proporcionado datos que apoyan esta explicación: por ejemplo, los pulsos del Cangrejo son mucho más estrechos (duran menos) que los captados a energías de rayos gamma.

Un dato muy notable, recogido de los púlsares de rayos gamma recién descubiertos, es que las estrellas de neutrones viejas, que giran despacio, crean rayos gamma mucho más eficazmente que las más jóvenes. Para calcular la edad de un púlsar, se mide la celeridad con que cambia su período de rotación a lo largo de los años. El período aumenta gradualmente porque la radiación emitida por el púlsar va drenando poco a poco su momento angular. La relación entre el período de pulsación y el ritmo de deceleración de la rotación establece aproximadamente el tiempo transcurrido desde que nació el púlsar en una explosión de supernova.

Para calcular el rendimiento en rayos gamma de un púlsar, se divide la energía que radia en rayos gamma por su pérdida total de energía, inferida de su período cambiante. Parece, no obstante, que Geminga y PSR 1055-52 emiten casi toda su energía en forma de rayos gamma, y aunque desconocemos la razón de esa proeza, por lo que se refiere a los rayos gamma, los púlsares mejoran con la edad.

Los resultados aquí expuestos son una muestra exigua de la asombrosa cantidad de datos que está obteniendo el *Observatorio Compton*; la mayoría de los fenómenos de rayos gamma son transitorios o variables, por lo que le esperan aún infinidad de descubrimientos. Ya ha conseguido llevar la consciencia más allá de la tradicional visión, basada en la luz, del universo. En la astronomía de rayos gamma, lo bueno no ha hecho más que empezar.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

QUASARS, BLAZARS AND GAMMA RAYS. Charles D. Dermer y Reinhard Schlickeiser, en *Science*, vol. 257, págs. 1642-1647; 18 de septiembre de 1992.

PROBING THE GAMMA-RAY SKY. K. Hurley, en *Sky and Telescope*, vol. 84, n.º 6, págs. 631-636; diciembre de 1992.

THE GAMMA-RAY UNIVERSE. D. A. Kniffen, en *American Scientist*, vol. 81, n.º 4, págs. 342-349; julio-agosto 1993.

Lluvia ácida sobre España

La emisión de contaminantes a la atmósfera en las zonas industrializadas, no sólo de Europa sino también de América del Norte, influye en la precipitación ácida sobre España

E. Hernández, J. Piorno, M. T. del Teso, J. Díaz

La contaminación atmosférica, uno de los obligados tributos del progreso industrial y técnico, arrastra consecuencias negativas para los individuos, los ecosistemas y el entorno. Con el efecto de invernadero, del que no es inseparable, la lluvia ácida constituye una forma habitual de esas alteraciones.

El adjetivo "ácida" que acompaña al sustantivo "lluvia" alude a su concentración de iones de hidrógeno, a su *p*H. A tenor del mismo, dividimos las soluciones en básicas, neutras y ácidas. El valor de referencia es el *p*H del agua, solución neutra prototípica, cifrado en 7. Por encima de este valor hablaremos de una solución básica y ácida, por debajo; de acuerdo con ello, una solución con un *p*H 2 será más ácida que otra con un *p*H 5.

Por precipitación ácida hemos de entender una deposición sólida (nieve o granizo), lluvia o una agrupación de gotitas de niebla con *p*H menor que 5,6. Este límite se establece al admitir que la concentración media y natural del dióxido de carbono es de 340 partes por millón (ppm), que corresponde a un *p*H de 5,6 a la temperatura de 15 ºC para la lluvia no contaminada.

Las precipitaciones ácidas pueden producirse lejos de los focos de contaminación, asociadas a fenómenos de transporte transfronterizo. Este puede ser a escala planetaria, lo que, para latitudes medias, quiere decir que abarca distancias de 10.000 km y una duración temporal superior a 100 horas; o a escala sinóptica, cuya dimensión espacial es del orden de 1000 km y su duración está comprendida entre 10 y 100 horas; hay también una mesoescala propia de fenómenos con duración entre 10 y 1 horas y dimensiones en torno a 100 km. Junto a estas precipitaciones se dan otras que descargan en las proximidades de las fuentes emisoras, cuya dimensión espacial está por debajo de los 100 km y no duran más de una hora. Se las denomina convectivas y se originan a partir del fuerte calentamiento solar de zonas del suelo, que genera corrientes verticales ascendentes. Tales lluvias locales pueden ser de carácter fuertemente ácido (hasta por debajo de 3,6).

Las precipitaciones ácidas de cualquier escala dejan sentir su influencia en los ecosistemas acuáticos, ya que las especies están adaptadas a unos límites muy estrictos del *p*H del medio, y terrestres, por la alteración que provocan en el estrato superficial. (La mayoría de las cosechas, por ejemplo, requieren un *p*H superior a 4,5.) Aunque de menor importancia, se han registrado también precipitaciones de carácter altamente básico, con no menores efectos negativos.

Entre los compuestos que confieren el carácter ácido a las precipitaciones destacan el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y el ácido nítrico (HNO_3), que se forman en la atmósfera a partir de precursores químicos emitidos desde tierra por causas naturales o artificiales: el dióxido de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x), respectivamente. La energía necesaria para las reacciones de oxidación involucradas la aporta la radiación solar, en particular la de onda corta, comprendida en la banda de 240 a 300 nanómetros. Además, según sea la temperatura a la que se realicen las reacciones, así serán la cinética y el orden de las mismas y las constantes de disociación de los compuestos; es decir, la temperatura influirá en el tiempo que tardan las reacciones en producirse.

El SO_2 es emitido a la atmósfera tanto por fuentes naturales como antropogénicas, siendo la aportación de las primeras superior al 50 %. El 95 % del SO_2 presente en la atmósfera se genera dentro de ella a partir de la oxidación del sulfuro de hidrógeno procedente de la descomposición de la materia orgánica. Las fuentes artificiales de SO_2 son, fundamentalmente, la combustión de carburantes fósiles (carbón y fuel-oil) y la fundición de minerales. Los óxidos de nitrógeno han recibido menor atención. Sin embargo, en Europa y en los Estados Unidos su contribución a las deposiciones ácidas es mayor que la atribuible al dióxido de azufre, ya que, por ejemplo, en las centrales térmicas y en los ambientes urbanos la conversión de los óxidos de nitrógeno es más rapida que la de los óxidos de azufre.

El monóxido de nitrógeno (NO), precursor principal del ácido nítrico, procede directamente, en un 80 %, de fuentes naturales, mientras que casi todo el NO_2 atmosférico es de origen antropogénico. La actividad bacteriana que degrada los compuestos nitrogenados representa la principal fuente natural de NO_2, mientras que la combustión es la principal fuente antropogénica de óxidos de nitrógeno. Conviene recordar que los focos de emisión humanos están concentrados,

E. HERNANDEZ, J. PIORNO, M. T. DEL TESO y J. DIAZ llevan veinte años dedicados a la investigación en problemas de contaminación atmosférica. Pioneros en abordar el problema de la lluvia ácida en la península Ibérica, centran su interés en el estudio de la misma en los focos productores de contaminación del país. Hernández es catedrático de física en el departamento de astrofísica y ciencias de la atmósfera de la Universidad Complutense, al que pertenecen también Piorno y del Teso. Díaz se halla adscrito al Centro Universitario de Salud Pública de Madrid.

1. ESTUDIOS RECIENTEMENTE realizados para evaluar los efectos de la contaminación atmosférica sobre Europa ponen de manifiesto que en España el porcentaje de árboles dañados se ha duplicado de 1989 a 1991, fecha en que estaba afectado alrededor de un 7 % del total.

por lo general, en áreas urbanas e industriales, lo que explica el predominio de las emisiones de origen antropogénico en la tasa de contaminación atmosférica a escala regional.

Hay otros compuestos que contribuyen también a la acidez de las precipitaciones. Así, los ácidos orgánicos que tienen su origen en vertidos a la atmósfera de compuestos alifáticos y aromáticos (hidrocarburos de cadena abierta y cadena cerrada respectivamente). Esta contaminación adquiere particular intensidad en las zonas más industrializadas de Estados Unidos y Europa. En algunas zonas de Gran Bretaña, la precipitación con elevada concentración de ácido clorhídrico (HCl) tiene la misma importancia que la relacionada con el ácido nítrico.

Antes de cerrar este apartado de factores contaminantes hemos de aludir a la presencia en la atmósfera de cationes. Estas partículas de carga positiva —iones calcio (Ca^{2+}), sodio (Na^{+}), potasio (K^{+}), magnesio (Mg^{2+}) o amonio (NH_4^{+})— proceden de la superficie terrestre y, sobre todo, del mar. Se trata de sustancias, presentes en el suelo, que son muy solubles, por lo que sufren arrastre en disolución hasta los ríos y de allí al mar. Cuando se producen fuertes evaporaciones en la superficie de los océanos, estos cationes alcanzan la atmósfera. Debido a su basicidad, son capaces de neutralizar los efectos de las sustancias ácidas e, incluso, de generar precipitaciones de carácter básico de consecuencias igualmente negativas para los ecosistemas.

Una vez instalados en la atmósfera, los precursores padecen la oxidación a la que se debe finalmente la acidificación de la lluvia. No sucede de una única manera.

Empecemos por la transformación del dióxido de azufre en H_2SO_4. Por paradójico que resulte, la transformación directa de aquél en éste contribuye poco a la concentración total media de ácido sulfúrico en la atmósfera. El ozono (O_3), contaminante secundario formado en la atmósfera por fotooxidación, es agente de la oxidación directa del dióxido de azufre en trióxido de azufre (SO_3), como lo es el oxígeno atómico (O^{-}). El oxígeno, muy inestable, puede reaccionar con cualquier sustancia de la atmósfera, aunque las concentraciones sean muy bajas, incluso del orden de 100.000 átomos por centímetro cúbico.

Importan más las vías indirectas de oxidación del SO_2. En ellas intervienen radicales hidróxidos (OH^{-}, OHO^{-} y CH_2OHO^{-}), todos los cuales actúan en fase gaseosa. También puede ser adsorbido en la superficie de algunos sólidos, donde ocurre entonces su oxidación, ya sea por el ozono o por otras moléculas. El SO_2, oxidado directa o indirectamente, pasa a SO_3, que, en presencia del vapor de agua de la atmósfera, se transforma en ácido sulfúrico.

Se forma ácido nítrico desde los óxidos de nitrógeno, sobre todo a partir del monóxido (NO). Este compuesto se transforma en la atmósfera en dióxido de nitrógeno (NO_2), bien mediante una cadena de reacciones iniciadas por radicales libres hidróxidos (OH^{-}), en las que participan fundamentalmente moléculas de tipo orgánico, bien mediante una oxidación directa por el ozono (se ha determinado que la constante de reacción, cuando intervienen radicales hidróxidos, es del orden de 100 veces superior a la de las reacciones en que el ozono sirve de oxidante). Una vez constituido, el dióxido de nitrógeno se transforma a su vez, en presencia de radicales OH^{-}, en ácido nítrico.

La vida media del dióxido de nitrógeno en la atmósfera en presencia



de radicales hidróxidos es de sólo un día, frente a los 7,7 días del dióxido de azufre, por lo que cabe concluir que las precipitaciones ácidas cuyo carácter se debe al ácido nítrico (HNO_3) están asociadas a fenómenos de escala sinóptica, mientras que las que deban su acidez al ácido sulfúrico pueden estar relacionadas con fenómenos de transporte a escalas superiores.

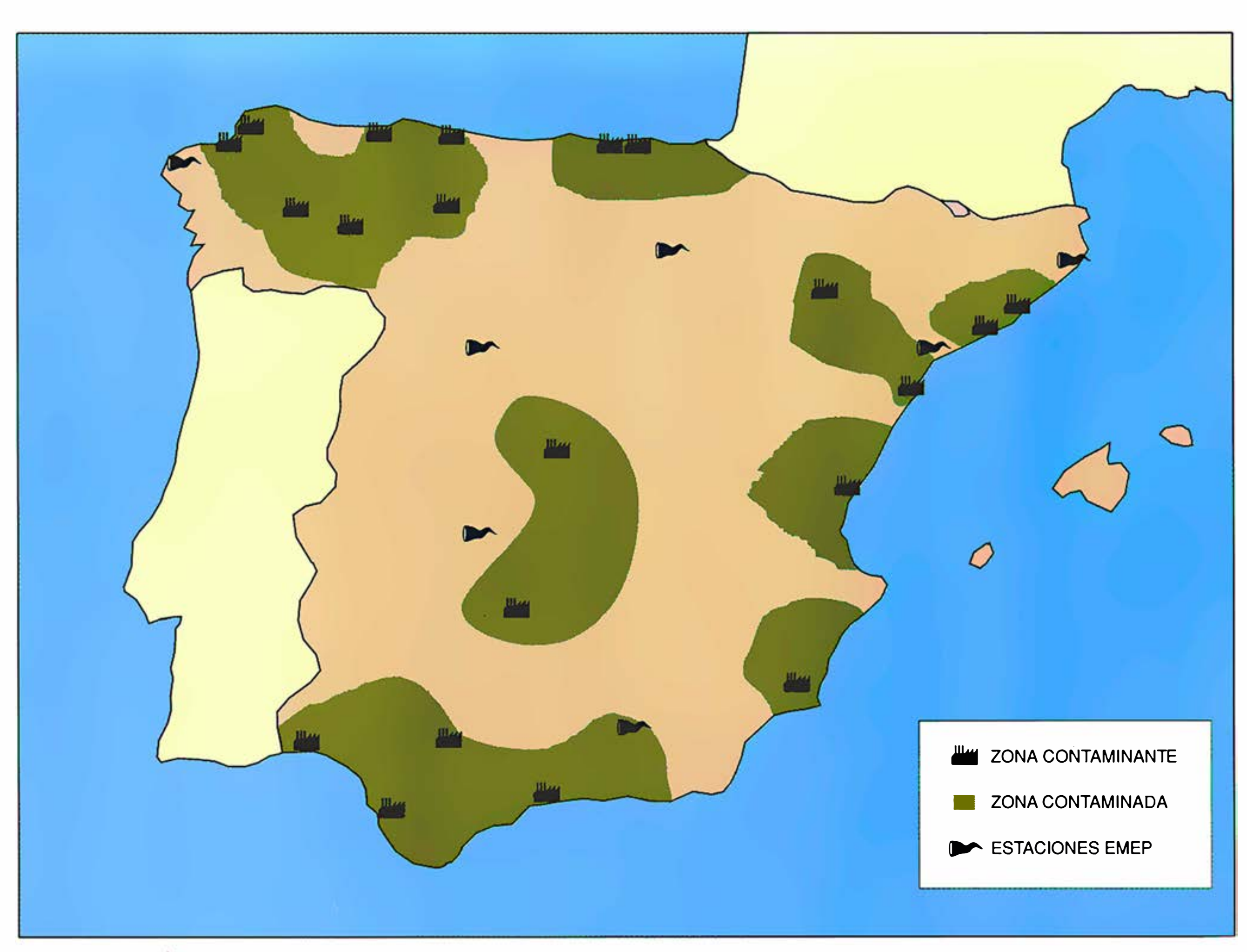
Si se exceptúan las precipitaciones de carácter convectivo, las deposiciones ácidas se producen a grandes distancias del foco emisor. Las trayectorias seguidas por las masas de aire hasta el lugar donde se desencadena la precipitación influirán decisivamente en su naturaleza. Así, por ejemplo, el carácter ácido de una masa de aire que haya tenido su origen en una zona contaminada y que llegue a la península Ibérica a través del océano, se verá atenuado, o incluso neutralizado, por los cationes que capte durante su desplazamiento marítimo; o, al contrario, una masa de aire de origen marítimo que tenga carácter básico puede llegar a producir precipitaciones ácidas si pasa por una región contaminada.

No cabe esperar, pues, que el *p*H de precipitaciones recogidas en distintos momentos en una misma estación meteorológica —alejada de los focos de emisión— sea el mismo, aun cuando la emisión de precursores no haya experimentado mientras tanto cambio alguno. Si las corrientes de aire que llegan hasta la estación en momentos distintos siguen trayectorias que pasen sobre focos ácidos y básicos diferentes, el *p*H de las precipitaciones que lleven asociadas diferirá mucho, drásticamente incluso. Estos efectos transfronterizos no serán perceptibles en estaciones que estén demasiado cerca de un foco emisor potente, cuya acidez enmascarará la emisión traída de lejos por las corrientes.

En el año 1979 se firmó el Convenio de Ginebra sobre Contaminación Atmosférica Transfronteriza y se estableció el Protocolo EMEP (acrónimo de “European Monitoring and Evaluation Programme”, o Programa Europeo de Evaluación y Seguimiento) que fue ratificado por España en 1983. Según este convenio, los países firmantes se comprometen a la instalación de estaciones que midan, por una parte, parámetros meteorológicos típicos (temperatura, punto de rocío, velocidad del viento, presión y otros), y, en cuanto a contaminantes, concentraciones de dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre, ozono troposférico, metano (CH_4), partículas en suspensión (núcleos de Aitken, es decir, partículas de diámetro inferior a 0,1 micrometros de diámetro, polvo y otras), cantidad de precipitación y turbiedad atmosférica. El agua recogida se examina en el laboratorio, donde se determina su *p*H y las concentraciones de aniones y cationes.

Las estaciones EMEP han de cumplir ciertos requisitos; entre ellos, que se instalen en un medio rural (ajeno a la influencia de las ciudades) y estén lejos de zonas edificadas. La distancia mínima entre un emplaza-

2. AREAS CONTAMINANTES y contaminadas de nuestro país. Como la distancia máxima entre estaciones de control de la contaminación recomendada por el Programa EMEP es de 300 km, son puntos posibles para su ubicación Noya (La Coruña), Figueras (Gerona), Roquetas (Tarragona), Logroño, Ciba (Valladolid), San Pablo de los Montes (Toledo) y La Cartuja (Granada). Excepto en Ciba, en todos estos lugares operan ya estaciones.



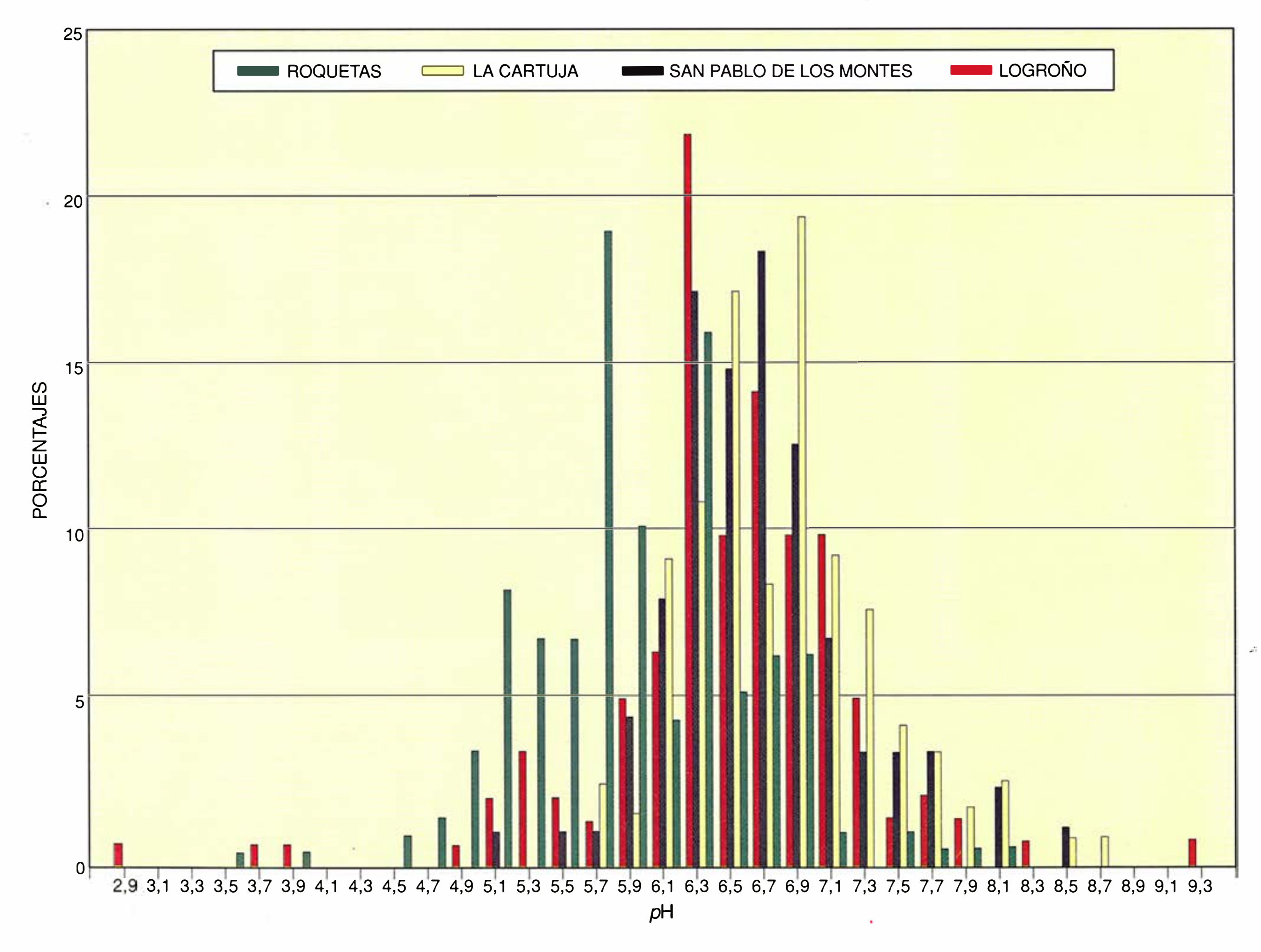
miento y el foco contaminante depende de la intensidad de la fuente; en el caso de grandes centrales térmicas, será de al menos 40 km. En el caso de que la distancia sea menor, la estación estará dotada de registros de viento para eliminar los datos procedentes de la dirección en que se encuentren las fuentes contaminantes; para su instalación se evitarán asimismo los valles porque en ellos, en las noches de invierno, se producen a veces estratificaciones atmosféricas muy estables, que impiden la ventilación de la zona. Las ubicaciones ideales serán, pues, las laderas o estribaciones de las montañas, ya que tampoco deberán estar sometidas a vientos muy fuertes. En definitiva, se le buscará un alojamiento tal que la contaminación de procedencia distante esté lo menos perturbada posible por las fuentes contaminantes del entorno.

3. HISTOGRAMAS de *p*H para estaciones EMEP. Utilizando los datos disponibles sobre precipitación ácida suministrados por las estaciones de Roquetas, La Cartuja, San Pablo de los Montes y Logroño, pertenecientes a la Red EMEP, se han elaborado los histogramas de frecuencia para los valores de *p*H para cada una de ellas. Los extremos de acidez y basicidad corresponden a valores de *p*H de 2,9 y 9,3 respectivamente, registrados ambos en la estación de Logroño.

Teniendo en cuenta dónde están los focos con mayor concentración de contaminantes de España y que la distancia máxima entre estaciones marcada por el Programa EMEP ha de ser de 300 km, se obtiene que los puntos posibles para la ubicación de las estaciones de observación son los siguientes: Noya (La Coruña), Figueras (Gerona), Roquetas (Tarragona), Logroño, Ciba (Valladolid), San Pablo de los Montes (Toledo) y La Cartuja (Granada). La primera estación en entrar en funcionamiento fue la de San Pablo de los Montes en 1984. Actualmente todas están operando, excepto la de Ciba. Recientemente ha entrado en funcionamiento otra estación EMEP en Menorca. Nosotros nos hemos centrado en las primeras estaciones operativas: San Pablo de los Montes, La Cartuja, Logroño y Roquetas.

Del análisis de los datos disponibles suministrados por dichas estaciones en el período comprendido entre los años 1986 y 1990, se desprende que el porcentaje de observaciones en los que el *p*H de la precipitación recogida está por debajo del umbral de 5,6 establecido para que una precipitación sea considerada ácida oscila entre un 37,4 % en San Pablo de los Montes y un 2,3 % en Roquetas. En cuanto a la precipitación con *p*H superior a 7,2, es decir, básica, su incidencia varía entre un 22,7 % en La Cartuja y un 2,4 % en San Pablo de los Montes. Los valores extremos del *p*H oscilan entre 2,9 y 9,3, ambos registrados en Logroño. Pese a que los días en que el *p*H de la precipitación puede considerarse neutro varían entre el 60,2 % de San Pablo de los Montes y el 82,6 % de Logroño, el efecto de las precipitaciones ácida y básica sobre el ambiente no deja de ser importante, como han puesto de manifiesto estudios recientes sobre el estado de nuestros bosques.

Tal y como cabe esperar de que haya diferentes focos contaminantes y distintas trayectorias de masas de aire, no es a un mismo anión al que se debe la mayor contribución al *p*H en cada estación; así, en San Pablo de los Montes el de mayor contribución es el anión nitrato (NO_3^-), en La

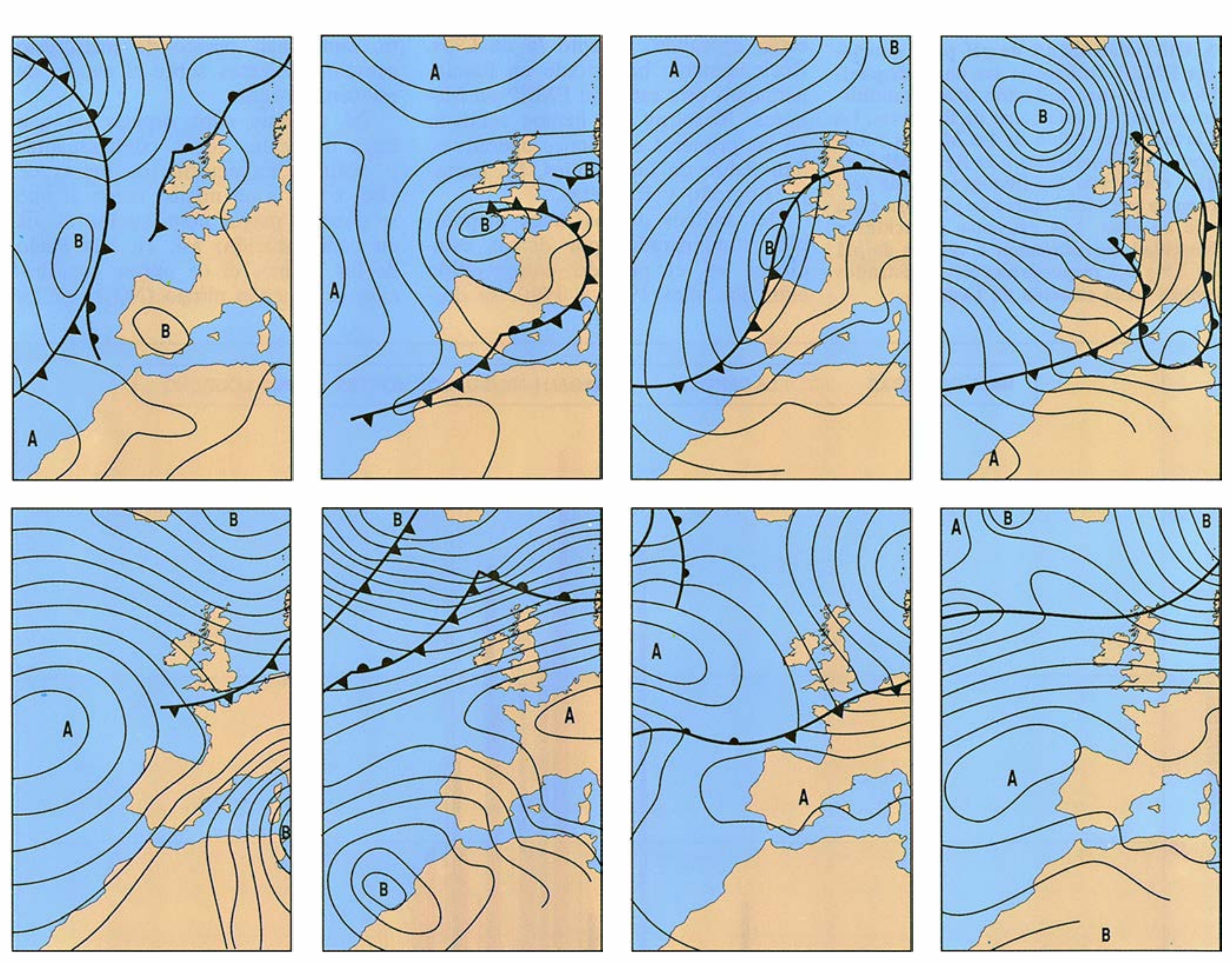


Cartuja el sulfato (SO_4^{2-}) y en las de Logroño y Roquetas el cloruro (Cl^-). En cuanto a los cationes, la basicidad de la precipitación viene determinada por el ion calcio (Ca^{2+}) en San Pablo de los Montes, La Cartuja y Logroño, y por el ion magnesio (Mg^{2+}) en Roquetas. Para detectar la dependencia existente entre los distintos iones y el *p*H se utilizará el coeficiente de correlación, que nos indica que aquélla está siempre por encima del nivel del 90 %, excepción hecha del anión sulfato en la estación de Logroño.

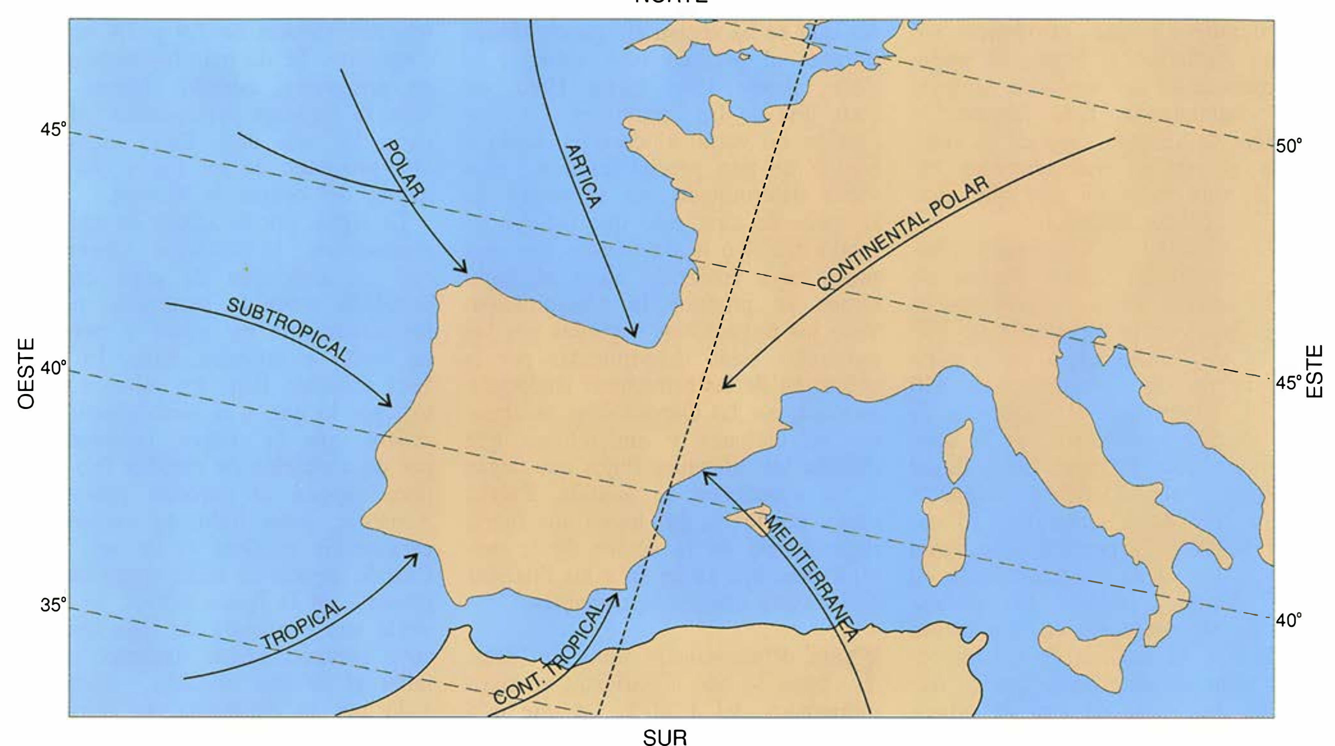
Estas medidas de *p*H extremo son análogas a las efectuadas en otros lugares del planeta que padecen los efectos de la lluvia ácida. Como en ellos, también aquí se observa que ésta se produce con mayor frecuencia que la básica, salvo en la estación de Roquetas. Si se analizan los valores medios de la acidez, se ve que caen entre un pH medio de 4,2 para Roquetas y de 5,6 para La Cartuja, resultados que coinciden con los de otros lugares, dado el mismo criterio de medida. El problema es aún más preocupante habida cuenta de que las estaciones EMEP han de estar alejadas de focos emisores, lo que lleva a pensar que en un núcleo contaminado, como una gran ciudad o los alrededores de una central térmica, estos valores de *p*H pueden resultar aún más extremos.

Como se ve, estaciones hasta cierto punto próximas exhiben patrones de acidez distintos. Semejante discrepancia tiene que ver con la naturaleza de las masas de aire y con las trayectorias que siguen en su desarrollo. Para determinar la procedencia de las masas de aire según su origen, se las clasifica en cuatro grupos, coincidentes con los cuatro sectores determinados en la circunferencia por las direcciones fundamentales de la rosa de los vientos. Así, el sector o cuadrante 1 es el de los flujos que irrumpen entre el norte y el este; el sector 2, entre el este y el sur; el sector 3, entre el sur y el oeste, y el sector 4, entre el oeste y el norte.

Un método sencillo para dibujar la trayectoria de una masa de aire es el de



4. SITUACIONES SINOPTICAS más frecuentes sobre la península Ibérica (*de izquierda a derecha*). La de tipo 1 se caracteriza por la existencia de una borrasca al sureste de la península; su persistencia máxima es en primavera y verano con un período de seis días. En la situación de tipo 2 hay una borrasca al suroeste de las islas Británicas y un frente que recorre la península Ibérica; se da con mayor frecuencia en primavera y su máxima persistencia es de 12 días. La de tipo 3 se distingue por flujos del suroeste; lleva asociadas precipitaciones generalizadas, aparece más frecuentemente en invierno y su máxima persistencia es de ocho días. La situación de tipo 4 se encuentra asociada con flujos del noroeste; comporta precipitaciones en el noroeste peninsular y cornisa cantábrica; se da más frecuentemente en invierno, con una persistencia máxima de siete días. En la de tipo 5 encontramos flujos del nordeste; suele presentarse en primavera, con una persistencia máxima de seis días. La situación de tipo 6 es la de predominio de flujos del sureste; aparece con mayor frecuencia en primavera. Tenemos en la de tipo 7 un anticiclón de gran espesor sobre la península; ocurre, de preferencia, en otoño; puede durar hasta 16 días. La situación de tipo 8 muestra un anticiclón de poco espesor al noroeste de la península Ibérica; se da sobre todo en verano y tiene una persistencia máxima de 6 días.



5. TRAYECTORIAS DE MASAS DE AIRE que llegan a la península Ibérica. En razón de su origen podemos clasificarlas en continental polar, mediterránea, continental tropical, tropical, subtropical, polar y ártica. La masa continental polar proviene del continente europeo, zona contaminada, y está asociada a flujos del primer sector. La masa mediterránea tiene su origen en Argelia, en la cuenca del Mediterráneo y se halla asociada a flujos del segundo sector. La masa continental tropical, relacionada también con éste, viene del Sahara. Del océano Atlántico llega la masa marítima tropical, relacionada con flujos del tercer sector. La masa subtropical está asociada con vientos del oeste. Del noroeste llega la masa marítima polar, relacionada con flujos del cuarto sector. La masa ártica, que baja del norte, trae flujos del cuarto sector.

las "retrotrayectorias de período 48 horas"; consiste en tomar como origen el lugar de observación y, teniendo en cuenta el viento existente, determinar dónde estaba esa masa una fracción de tiempo atrás. Este proceso se itera hasta averiguar la posición que ocupaba 48 horas antes. Su fundamento físico es cinemático y dinámico a la vez; estriba tanto en el movimiento de la masa de aire (cinemática) como en las fuerzas que intervienen en el origen de dicho movimiento (dinámica). Las trayectorias se trazan en las superficies isobáricas de 950, 850 y 750 hectopascales, correspondientes, aproximadamente, a alturas de 500, 1500 y 2500 metros sobre el nivel del mar (el hectopascal, o HPa, es la unidad de presión equivalente a 100 newton por metro cuadrado).

Veamos qué trayectorias proporcionaron valores extremos de acidez para cada una de las estaciones. En San Pablo de los Montes, el mínimo valor de *p*H registrado en el período bajo estudio es de 3,4. Al analizar las concentraciones de los aniones medidos el día en que se obtuvo ese *p*H mínimo, se observa una concentración muy alta del ion sulfato; aparecen también altas concentraciones del catión amonio, que neutralizan en parte la acidez de la precipitación; es decir, si no hubiese sido por la contribución de este catión, la acidez hubiese resultado mayor. Las trayectorias para los niveles 950, 850 y 700 HPa nacen en el sur de Inglaterra y noroeste de Francia, y antes de llegar a la estación de San Pablo pasan por Bilbao. Su origen y el paso por esta zona contaminada fueron responsables de la acidez detectada. El máximo de *p*H medido en esta estación durante el período estudiado fue de 8,1. La trayectoria en 950 HPa tiene su origen en el primer sector; en 850 HPa y 750 HPa nacen en el centro de Argelia y atraviesan el Mediterráneo por la zona no contaminada del Estrecho. Estos aspectos son los responsables del carácter básico de la precipitación.

En la estación de La Cartuja la máxima acidez corresponde a un *p*H de 5,6. La ubicación de esta estación marca el carácter apenas ácido de las precipitaciones recogidas. En este caso el máximo se debió a una masa de aire que procedía, en los tres niveles, del océano Atlántico y penetró por la zona contaminada del NO peninsular. Este último hecho ha sido el responsable de la neutralización del carácter básico que correspondería a la precipitación por su origen e incluso la ha dotado de un carácter ligeramente ácido. El máximo de *p*H se registró con un valor de 8,5. El análisis de las trayectorias, en los tres niveles estudiados, pone de manifiesto que se trataba de una masa de aire que procedía del océano Atlántico, al SO de la península, penetraba por el estrecho de Gibraltar y bordeaba las zonas contaminadas. Su carácter básico se puede atribuir a una alta concentración del catión sodio y a la inexistencia de especies ácidas. Ese mismo día se registró precipitación también en Roquetas; su *p*H fue 6,5, valor que denuncia el paso de la trayectoria por la vertical de Cartagena, zona fuertemente contaminada que neutraliza el carácter básico original de la precipitación.

En la estación de Logroño el valor mínimo de *p*H fue de 2,9. En todos los niveles el origen de esta trayectoria se encuentra en el norte de Alemania; nace, pues, en la zona contaminada de Europa, para más tarde atravesar otra zona contaminada en el sur de Gran Bretaña. Son corrientes del NE. El máximo de *p*H, de valor 9,3, corresponde a fuertes vientos del NO pe-

ninsular. El análisis de las trayectorias demuestra que provienen del océano Atlántico y llegan al punto de observación sin atravesar ninguna zona contaminada. Esto justifica la ausencia de aniones capaces de compensar el carácter marcadamente básico de una masa de aire que atraviesa el océano Atlántico.

En la estación de Roquetas los valores de máxima acidez fueron de 5,0. El análisis de las trayectorias es el siguiente: en la topografía de 950 HPa la trayectoria nacía en la zona contaminada de Cartagena; en 850 HPa el origen era el mismo y la masa de aire transcurría por la zona contaminada de Levante hasta llegar a Roquetas; en 700 HPa la trayectoria era del cuarto cuadrante. El carácter ácido de la precipitación venía marcado por la alta concentración de iones cloruro y sulfato. El máximo valor de *p*H detectado en la estación fue de 8,4. El análisis de las trayectorias pone de manifiesto que se trataba de una masa de aire de origen mediterráneo que llegaba hasta Roquetas sin atravesar focos de contaminación.

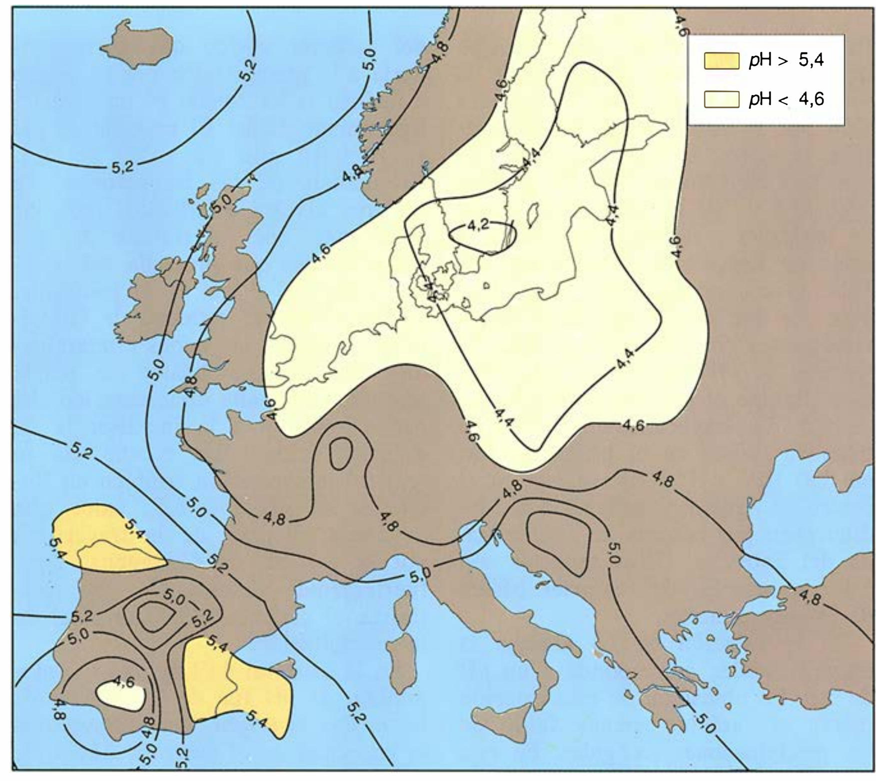
Un análisis de las trayectorias seguidas por las masas de aire como el descrito anteriormente se ha llevado a cabo para cada uno de los días en los que se ha registrado precipitación durante el período bajo estudio, es decir, desde 1986 hasta 1990, en cada una de las estaciones. La conclusión no varía: el carácter ácido o básico de una precipitación no sólo viene determinado por el origen de la masa de aire, sino que influye de modo decisivo la trayectoria que esta masa haya recorrido hasta el lugar donde se produce la precipitación. Pero las trayectorias seguidas por las partículas están determinadas por la ubicación de las estructuras sinópticas, es decir, por las disposiciones recurrentes de ciclones y anticiclones que definen los diferentes flujos que llegan a las estaciones de medida. Parece claro, por tanto, que habrá una fuerte dependencia de la acidez de la precipitación con respecto a las distintas situaciones sinópticas reinantes.

Para diferenciarlas unas de otras, éstas se han clasificado en tipos numerados del 1 al 8. La que está asociada a los mayores valores de acidez es la que corresponde a flujos del primer cuadrante (la número 5). Este tipo de situación dominaba en la península cuando se registraron los mínimos de *p*H en las estaciones de Logroño y San Pablo de los Montes, con valores de 2,9 y 3,4 respectivamente. Se da más frecuentemente en primavera, cuando alcanza también su máxima persistencia, en torno a los seis días. Estas masas de aire proceden de los focos contaminantes del centro de Europa.

Le sigue, por la acidez de sus precipitaciones, la situación número 7, con un anticiclón de gran espesor instalado sobre la península; ocurre frecuentemente en otoño y persiste, en otoño e invierno, hasta 16 días. Esta situación tiene los mismos efectos, por lo que a la contaminación se refiere, que la octava, caracterizada por un anticiclón de carácter frío y de poco espesor al noroeste peninsular. Acontece, sobre todo, en verano. Su persistencia máxima es de seis días. Cuando alguna de estas situaciones se presenta en la época estival, se desarrolla una estructura de baja térmica, cuyo comportamiento dinámico es similar al de una borrasca —caracterizado por la existencia de corrientes ascendentes—, si bien su origen es el calentamiento solar intenso. Si estas condiciones van acompañadas de un grado de humedad suficiente, las corrientes ascendentes pueden provocar condensaciones rápidas que desarrollan una nubosidad de tipo cumulonimbo. Estas estructuras desencadenan la mayoría de las precipitaciones intensas en los meses de verano sobre la península, y se denominan convectivas debido a las fuertes corrientes verticales ascendentes que las originan. Evidentemente, el tipo de precipitación asociada es de carácter local. Con esta situación dominando sobre la península se han detectado valores de *p*H 3,6 en la estación de San Pablo de los Montes.

Los valores mayores de basicidad aparecen asociados a la situación sinóptica número 4, definida por flujos procedentes del noroeste de la península Ibérica. Este aspecto quedó claramente reflejado en la precipitación más básica registrada durante el período bajo estudio, con un *p*H de 9,2 en la estación EMEP de Logroño.

La estrecha relación entre la acidez de las precipitaciones y las trayectorias transfronterizas de las masas de aire asociadas se manifiesta también de forma directa como correlación entre la lluvia y los sectores de penetración de estas masas. Las trayectorias del sector 1, que son las dominantes en los meses de mayo y enero del período bajo estudio, corresponden a masas de aire que tienen su origen en el centro de Europa. El transporte transfronterizo será, pues, de carácter



6. MAPA DE ISOLINEAS DE *p*H SOBRE EUROPA, elaborado a partir de los datos suministrados por distintas estaciones del Programa EMEP desde 1986 hasta 1990. Se muestra una zona altamente contaminada en Centroeuropa, con valores de *p*H por debajo de 4,4. En la península Ibérica sobresalen dos núcleos de máxima acidez: uno de carácter puntual en la zona centro y el otro, más extenso, en el sureste. Las zonas de menor acidez de las precipitaciones corresponden al noroeste y a la región levantina.

ácido. Fenómeno que puede verse acentuado si su penetración en la península se realiza a través de la zona industrial de Bilbao.

Las trayectorias del sector 2, que en el período estudiado aparecen con más frecuencia en los meses de febrero y septiembre, aportan un transporte transfronterizo de carácter básico. No obstante, si penetran en España por la zona contaminada de Cartagena, ese carácter puede verse neutralizado e incluso llegar a tornarse ácido.

Cuando las trayectorias provienen del sector 3 —predominantes en los meses de septiembre y noviembre en el período estudiado—, aportan precipitaciones básicas. Sin embargo, se han detectado dos factores que pueden enmascarar e incluso predominan sobre esta basicidad. Uno es el origen remoto de la trayectoria; el otro, el pasillo de penetración en la península. Si la fuente pertenece a una zona altamente contaminada de las costas norteamericanas, su posible neutralización, debido al paso por el océano, quizá no sea completa. Si la penetración en la península se realiza a través del foco contaminado de Cádiz y Huelva, la precipitación puede tener carácter ácido.

Cuando las trayectorias provienen del cuarto sector, el tipo de precipitación correspondiente debería ser básico. No obstante, el origen remoto de la trayectoria y su penetración por la zona contaminada del noroeste de la península afectan al carácter de la precipitación.

Todos estos efectos de larga distancia quedan ocultos en las proximidades de los focos de contaminación. Gran parte de las precipitaciones que se producen en nuestro país tienen carácter convectivo. Son, pues, precipitaciones de carácter local, que arrastran la contaminación de los focos cercanos y dan lugar a lluvias de marcado carácter ácido. Se ha comprobado que este efecto prevalece sobre el posible transporte transfronterizo.

Teniendo en cuenta las observaciones de precipitación ácida analizadas por nuestro equipo, así como los datos de estaciones EMEP recogidas en Europa desde 1986 hasta 1990, se ha podido completar un mapa de isolíneas de *p*H en el que por primera vez se incluye la península Ibérica. Sobresalen dos núcleos de acidez con valores de *p*H de 4,6, siendo el situado en la zona centro de carácter marcadamente local. Se ha demostrado que el origen de estos núcleos está relacionado con precipitaciones de carácter convectivo en el entorno de los focos de contaminación, fundamentalmente aglomeraciones urbanas y centrales térmicas.

Si se compara el *p*H de las precipitaciones en nuestra península con el medido en el resto de Europa, se pone de manifiesto que, aun sin llegar a los extremos globales de acidez que allí se dan, sí se trata de un problema preocupante. Prácticamente toda la península se encuentra afectada por la precipitación ácida; las zonas donde esta contaminación en la precipitación es menor son el noroeste y el sureste. Sólo los dos focos de acidez 4,6 son comparables con los de los países del norte de Europa, y en ellos los efectos observados sobre el ecosistema deberían ser similares a los sufridos en esos países.

Estos valores son valores medios; los extremos inferiores son mucho más bajos. Si se tiene en cuenta, además, que las estaciones EMEP han de hallarse lejos de los focos contaminantes, cabe pensar que los valores de *p*H medidos dentro de estos focos serán menores, y las consecuencias sobre el ambiente aún más graves.

Estudios recientes encaminados a determinar los efectos de la contaminación atmosférica sobre los bosques europeos, dentro del Programa Internacional de Cooperación de la Convención de Ginebra de 1985, han puesto de manifiesto que en España el porcentaje de árboles dañados se ha duplicado de 1989 a 1991, fecha en que era de alrededor del 7 %. La situación de nuestros bosques no parecerá tan preocupante si se la compara con la de los bosques centroeuropeos en general (20 % de árboles dañados en 1991), pero ésta debería tomarse como ejemplo de lo que puede suceder si no se pone límite a las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera. Recordemos que según el inventario CORINAIR de 1985 sólo éramos superados en las emisiones a la atmósfera de óxidos de nitrógeno, dentro de la CE, por Francia, Italia, Reino Unido y Alemania, y en los vertidos de dióxido de azufre tan sólo quedábamos detrás del Reino Unido y Alemania.

Valores de *p*H para estaciones EMEP

Tabulamos la distribución del *p*H de la precipitación en tres intervalos. El primero se refiere a la precipitación ácida, el segundo a toda la muestra observada y el tercero a la precipitación básica. Los *p*H promedios para cada uno de los intervalos aparecen en la tercera columna. Los valores promedios están, salvo para la estación de La Cartuja, por debajo del límite máximo de 5,6 establecido para que una precipitación sea ácida.

ESTACION	INTERVALO VARIACION	*p*H MEDIO
SAN PABLO DE LOS MONTES	(3,4 - 5,6) (3,4 - 8,1) (7,1 - 8,1)	4,5 5,7 7,6
LA CARTUJA	(3,4 - 5,6) (3,4 - 8,1) (7,1 - 8,1)	5,6 6,6 7,8
LOGROÑO	(3,4 - 5,6) (3,4 - 8,1) (7,1 - 8,1)	4,2 6,1 8,2
ROQUETAS	(3,4 - 5,6) (3,4 - 8,1) (7,1 - 8,1)	5,3 6,5 7,8

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ON RELATION BETWEEN ANTHROPOGENIC SO_2 EMISSIONS AND CONCENTRATION OF SULFATE IN AIR AND PRECIPITATION. C. Leck en *Atmospheric Environment*, volumen 23, n.º 5, págs. 959-966, 1989.

RELATIONSHIP BETWEEN RAIN AND SNOW ACIDITY AND AIR MASS TRAJECTORY IN EASTERN FRANCE. J. L. Colling en *Atmospheric Environment*, vol. 23, n.º 7, páginas 1487-1498, 1989.

MEASUREMENTS OF ATMOSPHERIC HNO_3, HCl, AND ASSOCIATED SPECIES ON AN SMALL NETWORK IN EASTERN ENGLAND. R. M. Harrison en *Atmospheric Environment*, vol. 24 A, n.º 2, págs. 959-966; 1990.

Perfiles

John Horgan

MARVIN L. MINSKY: *el genio de la inteligencia artificial*

Puede que las ideas de Marvin Minsky sobre la mente arrojen luces perdurables o puede que no, pero de lo que no cabe duda es que reflejan la suya propia. No es la mente, en su opinión, una entidad unitaria, sino una "sociedad" de elementos que se complementan y compiten entre sí. Minsky recela de la unicidad como de la tendencia del común de los mortales a explotar algo que nos ha llevado tiempo aprender. Para contrarrestar esta amenaza, que llama el principio de la inversión, Minsky se ha entrenado para "disfrutar de las situaciones incómodas" que se dan al enfrentarse a problemas completamente nuevos. "Es tan emocionante no ser capaz de hacer algo", confiesa.

Este credo le ha sido útil en su tarea de padre fundador de la inteligencia artificial (IA), disciplina que parte de la premisa según la cual el cerebro es una máquina, muy complicada sin duda, que algún día se verá superada por el ordenador. En la búsqueda de los fines de la IA, Minsky (que ha cumplido 66 años) ha recurrido a la informática, la robótica, la matemática, la neurología, la psicología, la filosofía e incluso a la ciencia ficción.

Pero los mismos rasgos que propiciaron el triunfo de Minsky en la aventura de la IA han provocado que quedara cada vez más apartado de ella conforme va madurando. De hecho, antes de mi entrevista, otros expertos me advirtieron de su posible chifladura y aconsejaron fuera con tiento de no sacar a colación las horas bajas por las que atraviesa la IA o su merma de influencia en la materia. Cierto teórico me pone en guardia sobre su tendencia a exagerar. "Pregúntele tres veces si realmente quiere decir eso, y si no le responde que sí las tres veces, no haga uso de ello."

Minsky posa con un componente de una "máquina que aprende" mediante redes neuronales que construyó con un compañero en 1951

Cuesta llevar una conversación fluida en su despacho del Laboratorio de Inteligencia Artificial. Se agita sin cesar, pestañea, mueve los pies y no para de arrastrar los objetos de la mesa. Diríase que extrae ideas y ejemplos de la chatarra, no de la memoria. Con frecuencia, aunque no siempre, parece incisivo. "Ya estoy divagando", dice, mohíno, cuando una incursión en el concepto de verificación en la IA acaba en un montón de frases sentenciosas. Hasta su físico tiene un aire de improvisación. La cabeza, grande y redonda, se cubre de un cabello transparente como haces de fibras ópticas. Se ciñe con un cinturón remachado que sostiene, además de los pantalones, la barriga y un estuche del que penden unos alicates de pinzas retráctiles. Parece un Buda de alta tecnología.

Minsky no puede, o quizás es que no quiera, albergar emociones durante mucho tiempo. Marca las distancias. Su único rival en la comprensión de la complejidad de la mente está muerto: "Freud tiene las mejores teorías nunca expuestas, después de las mías, sobre lo que de verdad es la mente", declara. Si la IA no ha progresado tan rápido como debiera, es porque los investigadores han sucumbido a la "envidia de la física" —el deseo de reducir los intríngulis del cerebro humano a simples fórmulas— y al temible principio de la inversión. "Van definiendo subespecialidades cada vez menores que luego examinan con detalle creciente, pero no están abiertos a hacer las cosas de una manera original." No se salva ni el propio laboratorio de IA del MIT: "No la considero una institución investigadora seria en este momento."

Pero lo desmiente cuando nos damos una vuelta por el centro. Minsky se enfrasca en una charla distendida sobre los computadores que juegan al ajedrez. Recuerda que Isaac Asimov rehusó siempre sus invitaciones para que viera los robots que se construían en el MIT por miedo a que su imaginación "quedara destrozada por este aburrido realismo".

Uno de los contertulios, al ver los alicates retráctiles de Minsky, saca los suyos, y con un rápido giro de la muñeca despliega las pinzas retráctiles. "Ríndete", le reta. Minsky, con una sonrisa, desenfunda su arma y se baten en un símil de pelea navajera. Pregunto: "¿Pueden desmontarse ellos solitos?" Minsky y sus colegas ríen la referencia a uno de los problemas fundamentales de la robótica.

De vuelta a su despacho, nos espera una joven doctoranda en estado de buena esperanza. Al día siguiente le

toca examen oral. "¿Estás nerviosa?", le pregunta. "Un poco", responde la chica. "Pues no deberías estarlo", y roza suavemente con su frente la de ella. Observando este cuadro, me doy cuenta de que hay muchos Minsky.

Demasiados, según Minsky. Hijo de un cirujano neoyorquino, de niño era un prodigio en matemáticas y música. Todavía compone "cosas del estilo de las de Bach", pero trata de sobreponerse al impulso diciéndose que la música suprime el pensamiento. "Tuve que matar al músico que llevaba dentro. Vuelve de vez en cuando, y le atizo."

Minsky empezó a pensar sobre el pensamiento —más exactamente, sobre el aprendizaje— en la universidad. Aunque estudió matemáticas (se formó en Harvard y Princeton) ha hurgado en otras disciplinas rebuscando ideas que pudieran iluminarle. En 1951 un colega y él construyeron una máquina, con tubos de vacío, motores y servomecanismos, capaz de "aprender" a orientarse por un laberinto. Fue la primera red neuronal. A este proyecto de ingeniería siguió la tesis doctoral de Minsky, que versa sobre aprendizaje automático.

En 1959, fundó, junto con John McCarthy —a quien se debe el término "inteligencia artificial"—, lo que hoy es el Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT. McCarthy se fue cuatro años después para crear su propio laboratorio en la Universidad de Stanford, y desde entonces han seguido caminos distintos. McCarthy ha liderado la corriente que propugna un modelo de IA basado en la lógica, mientras que Minsky sostiene que la lógica necesita definiciones precisas que el mundo real no respeta. Definir al pájaro como animal con plumas que vuela, apunta, no vale si el pájaro está muerto, enjaulado, pisó en cemento fresco "o ha estado meditando y decidió que volar es egoísta".

Ha sido todavía más duro con las redes neuronales, la tecnología cuyo desarrollo él mismo propició. En 1969, Seymour Papert (del MIT) y él publicaron *Perceptrons*, una crítica corrosiva que asestó a las redes neuronales un golpe mortal; la financiación disminuyó y su estudio languideció durante más de una década hasta que poco a poco ha empezado a repuntar. "No pretendía destruir, se queja, sino marcar los límites de la tecnología."

Aunque Minsky aplaude la reciente resurrección de las redes neuronales, recrimina que algunos investigadores "semicomerciales" sean menos abiertos de lo que debieran. "Escriben un artículo y dicen: 'miren, hizo esto', y no consideran que es igualmente maravilloso decir: 'miren, no puede hacer esto otro'. La mayoría no hacen buena ciencia, porque ocultan fallos y limitaciones." Insiste en que no hay un esquema único que pueda reproducir los recovecos de la mente, porque la mente misma emplea muchos métodos falibles que se respaldan y comprueban mutuamente. La compara con un camión articulado, que descansa sobre muchas ruedas, pero los que trabajan en IA "siguen diseñando uniciclos".

Algunos aspectos de la mente han resultado más difíciles de comprender o reproducir de lo que esperaba Minsky. Me confirma la conocida anécdota de que, a principios de los sesenta, le encargó a un estudiante un proyecto de visión artificial (reputada hoy un problema espinosísimo) como deber estival. Pero espera que todas las cuestiones candentes de la IA se resuelvan conforme las imágenes y los electrodos vayan revelando con más detalle la estructura del cerebro. "A mí me parece que todo lo que hemos hecho hasta ahora es como la química antes de Lavoisier", apostilla.

Minsky destiló sus reflexiones sobre el pensamiento en *The Society of Mind*, publicado en 1985. El libro consta de 270 ensayos, la mayoría de una sola página, que van desde reflexiones técnicas sobre las conexiones neuronales hasta excursos filosóficos sobre la identidad y autonomía del hombre. Advierte en el prólogo que la estructura atomizada del libro refleja su idea principal, "que se puede construir una mente a partir de muchas partes pequeñas, cada una de las cuales no tiene ningún sentido en sí misma". "Que yo sepa nadie ha leído el libro".

> *"Se puede construir una mente a partir de muchas partes pequeñas, cada una de las cuales no tiene ningún sentido en sí misma"*

Desprecia a quienes piensan que los ordenadores, aun pudiendo reproducir ciertos aspectos de la inteligencia humana, nunca llegarán a ser verdaderamente conscientes. "Los tales son unos perfectos idiotas." (Se muestra más comprensivo conmigo cuando cometo el fallo de sugerir que siempre habrá una diferencia cualitativa entre los humanos y las máquinas. Sólo me llama "racista".)

Minsky declara que el misterio de la consciencia es "trivial". "Lo he resuelto, y no entiendo por qué la gente no me escucha." La consciencia, explica, involucra a una parte de la mente que supervisa las demás. Esta función apenas si requiere un poco de memoria de corto alcance, o "un sistema de calidad no muy grande para llevar un registro". De hecho, algunos programas de ordenador, como el LISP, que permiten rastrear sus propios pasos de procesamiento, son "extremadamente conscientes", asegura, mucho más que los humanos, que tienen una memoria a corto plazo muy superficial.

Al igual que otros estudiosos de la IA, predice que algún día los ordenadores evolucionarán hasta trascender las posibilidades del hombre, un "chimpancé con traje". Los humanos pueden llegar a ser capaces de "descargar" su personalidad en los ordenadores y hacerse de esa manera más distinguidos y más fiables. Este apaño puede conferir una vida infinita, entre otras gangas. Minsky se imagina haciendo copias de sí mismo que podrían experimentar situaciones que ahora abomina.

No para. Hollywood podría proporcionarle un desahogo a su energía rebosante. Lo entiendo por fin cuando Laurel, una administrativa del laboratorio de IA, asoma para preguntar qué hay de nuevo. Minsky responde que la corporación Disney le ha contratado para diseñar un "vuelo mágico en la alfombra", basado en la película *Aladino*. Minsky ha estado trabajando en un tema de realidad virtual para un laboratorio de efectos especiales que ha montado la Disney.

Laurel apunta que Stephen W. Hawking, el cosmólogo británico, apareció hace poco en *Star Trek*, y sugiere que Minsky es el hombre ideal para representar "un genio extraterrestre" en la televisión. Le pregunto si en el papel de bueno o pérfido. "Ambas cosas", replica. Minsky queda intrigado, pero le preocupa que no sea capaz de representar las escenas adecuadamente. "No soy capaz de repetir lo mismo dos veces", confiesa.

Trabaja en un nuevo libro, *The Emotion Machine*. "Es una persona", me dice del título. Uno de los objetivos del mismo, me explica, es ayudar a la gente a reflexionar constructivamente sobre el pensamiento. "Me interesa la gente que intenta hacer algún trabajo sin dejar de ver la televisión o ir a los partidos de fútbol." El libro aconseja a esas personas que hagan "un pequeño diagrama de bloques" de su mente, con diferentes agentes marcados que compiten entre sí.

Ciencia y sociedad

Nobel de medicina

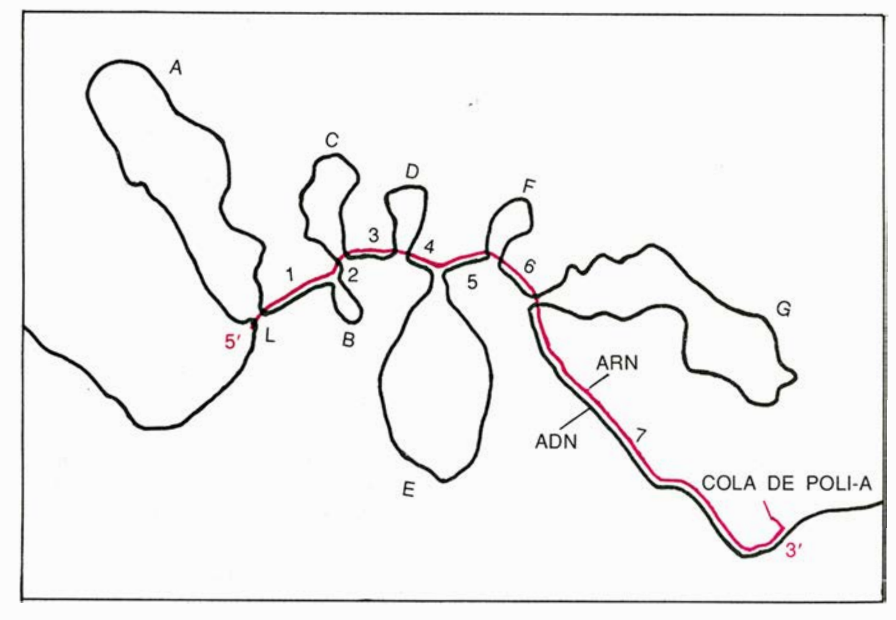
Mosaico genético

El premio Nobel de medicina de 1993 lo han recibido Richard J. Roberts y Philip A. Sharp por haber descubierto, en 1977, el carácter discontinuo de la información genética. Según James Darnell, cuyos trabajos cimentaron en buena medida el de Roberts y Sharp, este hallazgo quizá sea el avance más impresionante de la biología desde el descubrimiento de la doble hélice del ADN.

Roberts nació en Inglaterra, estudió química en la universidad de Sheffield y bioquímica en Harvard. En 1977 trabajaba en Cold Spring Harbor, donde ha permanecido hasta que, el año pasado, aceptó la dirección científica de New England Biolabs. Por su parte, Philip A. Sharp estudió química en la universidad de Urbana, especializándose más tarde en bioquímica en el Instituto de Tecnología de California. Pasó luego a Cold Spring Harbor, pero en 1977 trabajaba ya en el Centro Oncológico del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Hoy tiene su propia empresa, Biogen.

El ARN mensajero lleva, del núcleo celular al citoplasma, la información contenida en un gen para que sea leída en los ribosomas por la maquinaria celular de síntesis proteica. Parece natural que el ARN mensajero se ajuste al mensaje que porta, el fragmento de ADN original. Pero a principios de los años setenta se sabía que los otros tipos de ARN —ribosómico y de transferencia— sufren un proceso de maduración: la molécula final se origina a partir de una molécula precursora más larga. Quedaba pendiente si el ARN mensajero de las células eucariotas —es decir, dotadas de núcleo diferenciado— experimentaba un proceso similar entre su formación durante la transcripción del ADN y su lectura para la construcción de una proteína. En procariotas, donde transcripción y traducción son casi simultáneas, no cabía pensar que fuese así.

En 1976 aparecía ya claro que los cortes que transformasen el precursor en la molécula madura que se traduce en los ribosomas no eliminarían los extremos del precursor, sino que arrancarían segmentos de su interior. En el proceso de maduración no se perderían ni la caperuza ni la cola (llamada "de poli-A") moleculares, añadidas, durante la transcripción, al comienzo y final de la secuencia de nucleótidos que forma la molécula de ARN mensajero. Pero se suponía que ese proceso era imposible. Una cosa era la escisión de piezas auxiliares introducidas durante la transcripción por los cabos de la secuencia transcriptora y otra un mecanismo que rompiera la continuidad de la información genética. En menos de un año cambió la visión del proceso.



La naturaleza de carácter discontinuo de los genes se aprecia aquí con toda nitidez. Se hibridaron ADN que contenía el gen que codifica la proteína ovalbúmina y ARN mensajero maduro de ovalbúmina. Los ocho exones del gen (L, 1 a 7) se solapan con las regiones de ARN complementarias, mientras que los siete intrones (A a G) se observan en bucles. Se aprecian también el extremo 5' y la cola de poli-A. Las ilustraciones son de Pierre Chambon, de la Universidad de Estrasburgo

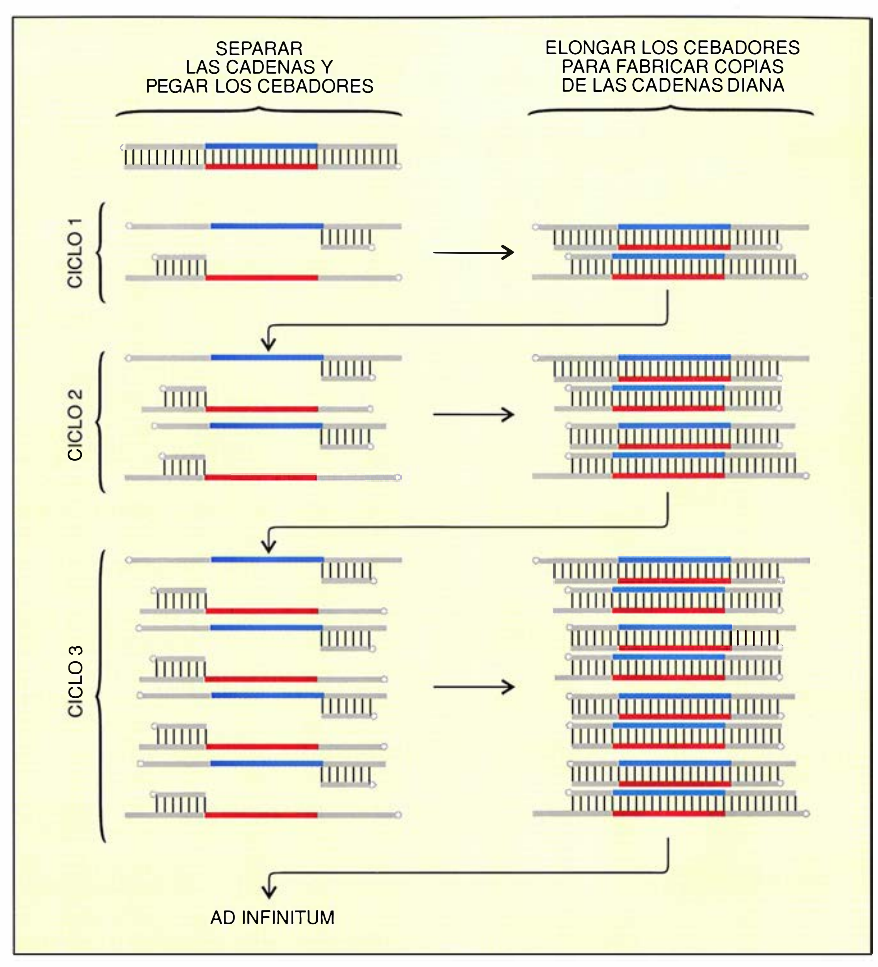
A mediados de 1977, en el congreso anual del laboratorio Cold Spring Harbor, los grupos de Roberts y Sharp dieron cuenta de los resultados que habían obtenido al hibridar una cadena de ADN de adenovirus —los causantes de los resfriados— con su correspondiente ARN mensajero, para formar un mixto de ADN y ARN. En sus microfotografías destacaban tres bucles monocatenarios de ADN que sobresalían en las zonas donde se habían unido el ADN y su ARN complementario. Significaba ello que las transcripciones de los tres segmentos génicos en cuestión habían sido cortadas del mensajero durante la maduración y que los cuatro trozos restantes se habían engarzado posteriormente; sólo a ellos, pues, se debía la codificación de la proteína asociada a ese gen. El también premio Nobel Thomas Cech, presente en el congreso, cuenta que "el publico quedó atónito; fue uno de esos momentos en que el mundo se pone cabeza abajo".

Walter Gilbert, de Harvard, llamó intrones a los segmentos o secuencias colocados entre fragmentos codificadores, y exones a estos últimos. No tardó en comprobarse que casi todos los genes de las células eucariotas tienen intrones (las bacterias carecen de ellos). Más largos que los exones codificadores por lo común, su tamaño y número varían de un gen a otro; a modo de ejemplo, los genes que determinan el colágeno, una proteína del tejido conjuntivo de cadena muy larga, contienen unos cuarenta intrones.

Amén de transformar radicalmente nuestra interpretación del código genético, el descubrimiento de los intrones ha permitido descorrer el velo sobre fenómenos ni siquiera imaginados. El proceso de corte y empalme

(*splicing*) puede efectuarse de varias maneras; cabe, por consiguiente, que un gen codifique más de una proteína, como ocurre con el gen de la cadena pesada de los anticuerpos: de una larga molécula del ARN precursor correspondiente se obtienen dos ARN maduros diferentes. Cech demostró que el ARN de *Tetrahymena termophila*, un protozoo, podía cortarse y volver a recoserse sin necesidad de enzimas mediadoras El ARN podía incluso catalizar la síntesis de otros ARN, hacer de enzima gracias a un intrón (*véase* "Función enzimática del ARN", por Thomas R. Cech; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1987).

Los errores cometidos en el proceso de corte y empalme producen talasemias, alteraciones hereditarias de la síntesis de hemoglobina. Los intrones podrían cumplir, tal vez, misiones reguladoras, determinando cuándo deba expresarse un gen en una proteína. Walter Gilbert ha ido más lejos con su modelo evolutivo: la reordenación de los exones crearía nuevos genes, no las mutaciones.



*La reacción en cadena de la polimerasa es un proceso cíclico en el que se dobla por vuelta el número de copias del segmento de ADN que se quiere reproducir (*marcado en azul y rojo*). La polimerasa extiende a cada lado de éste los cebadores añadidos, duplicando así la secuencia original*

Nobel de química

Reacción en cadena de la polimerasa

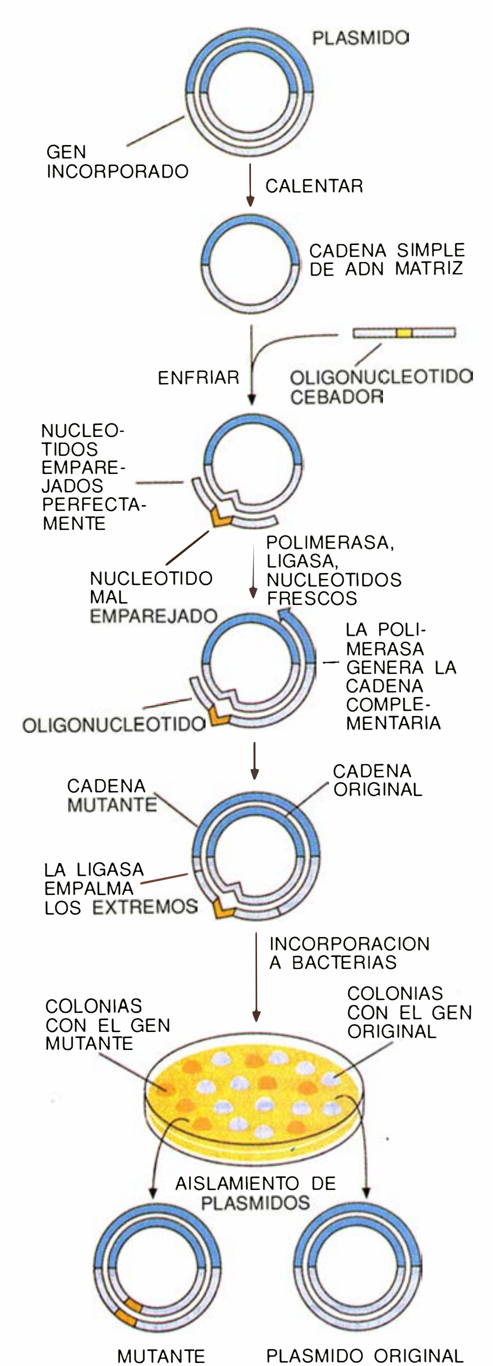
Kary B. Mullis y Michael Smith, galardonados con el Nobel de química de 1993, sólo comparten dos cosas. Primera, haber descubierto algo relativo a la multiplicación del material genético; y segunda, la gran importancia científica y económica de sus técnicas. Mullis nació en 1944 en Lenoir (Carolina del Norte). Estudió química en el Instituto de Tecnología de Georgia y en la Universidad de California en Berkeley. No enseña ni investiga en institución académica alguna; en estos momentos es asesor bioquímico y trabaja en casa. Cuenta que la idea por la que ha obtenido el premio se le reveló súbitamente durante un viaje en coche (*véase* "Reacción en cadena de la polimerasa", por Kary B. Mullis, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1990). La carrera y la imagen pública de Smith son más habituales. Nació en Blackpool en 1932, estudió bioquímica en Manchester hasta 1956 y se marchó al Canadá, donde sigue; allí enseña en la Universidad de la Columbia Británica.

Mullis trabajaba en 1983 en la empresa Cetus, de California. Andaba tras mecanismos que permitieran descubrir qué letra del alfabeto genético se encontraba en un punto determinado del ADN. Creyó, equivocadamente, que uno de los pasos del proceso no era viable. Buscando algún truco que lo evitara dio con algo mejor, un método sencillo de multiplicación, o amplificación, de cualquier fragmento de ADN: la reacción en cadena de la polimerasa. Gracias a la misma, podemos crear muestras suficientes para abordar una secuencia determinada de ADN, sin que requiera demasiado esfuerzo el obtenerlas.

La molécula de ADN consta de dos hebras —dos sucesiones de sólo cuatro componentes básicos, los nucleótidos— complementarias, como el positivo y el negativo de una fotografía. Cualquiera de las dos cadenas sirve de molde para la síntesis de su complementaria. En la célula, esa labor la desempeña una enzima, la ADN polimerasa, que recorre la cadena y coloca junto a cada nucleótido de la cadena original su complementario en la de nueva formación, que así va creciendo a partir de una breve secuencia (u oligonucleótido) ya unida (hibridada) a la cadena (el "cebador").

Para replicar un determinado fragmento de ADN con la reacción en cadena de la polimerasa se empieza por calentar y separar las dos hebras; una vez enfriadas, se hibridan dos segmentos: un segmento a la izquierda del fragmento a duplicar de una de las hebras y un segmento a su derecha en la otra hebra con sus respectivos complementarios, oligonucleótidos que hay que aportar al proceso y que hacen de cebadores. La polimerasa va extendiendo éstos, duplicando los fragmentos de las hebras originales que se quieren copiar. Una vez lograda la copia, se itera el proceso. De esta forma se tiene una especie de reacción en cadena: en cada ciclo se duplica el número de copias, y bastan veinte ciclos para obtener más de un millón de copias de la secuencia de partida. La técnica ha rendido muchísimos servicios a la ciencia de los últimos años. Se aplica, además, a la determinación del sexo de embriones, criminología y reconstrucción de genes prehistóricos.

Smith descubrió, iniciados los ochenta, cómo cambiar un nucleótido



*En la mutagénesis ortoespecífica, un plásmido (*doble cadena de ADN circular*) que contiene el gen que nos interesa se separa en dos cadenas sencillas mediante calor. Se incorpora luego un oligonucleótido sintetizado artificialmente, complementario de todo el área a derecha e izquierda del nucleótido que queremos modificar. Por acción de una polimerasa se forma, a partir del oligonucleótido, la cadena complementaria y la ligasa empalma sus extremos*

por otro en una determinada secuencia génica, con la sustitución consiguiente en el aminoácido cifrado de la proteína codificada. Hasta que no ideó esta técnica de mutagénesis ortoespecífica, las modificaciones corrían a cargo del azar, radiaciones inducidas y productos químicos.

En el procedimiento de Smith se separa con calor la doble hebra de un plásmido, fragmento de ADN circular que encontramos en los genomas bacterianos. Se sintetiza una breve secuencia complementaria de un segmento del ADN separado, salvo en el nucleótido que se quiere alterar. Se hibridan la cadena circular de ADN y este oligonucleótido. Esta copia se cierra mediante una enzima ligasa, y se tiene así un plásmido —bucle de ADN— en una de cuyas cadenas está el nucleótido correcto y en la otra el mutado. Este producto se inserta en el genoma de una bacteria, que sintetizará tanto la forma normal como la alterada de la proteína. La ventaja reside en que sólo hay que conocer unos cuantos nucleótidos a izquierda y derecha del deseado, y no todo el gen.

La mutagénesis ortoespecífica se utiliza para investigar la estructura y función de los genes, pero, en principio, vale también para alterar controladamente las proteínas y dotarlas de nuevas propiedades. Si bien el diseño de proteínas ya ha reportado algunos éxitos, como aumentar la estabilidad de ciertas enzimas, en general está limitado por nuestro desconocimiento de la vinculación que existe entre la estructura de una proteína y su función. Más esperanzadores son los experimentos dirigidos a producir anticuerpos catalíticos que aceleren de forma selectiva reacciones químicas.

Nobel de física

Púlsares y relatividad general

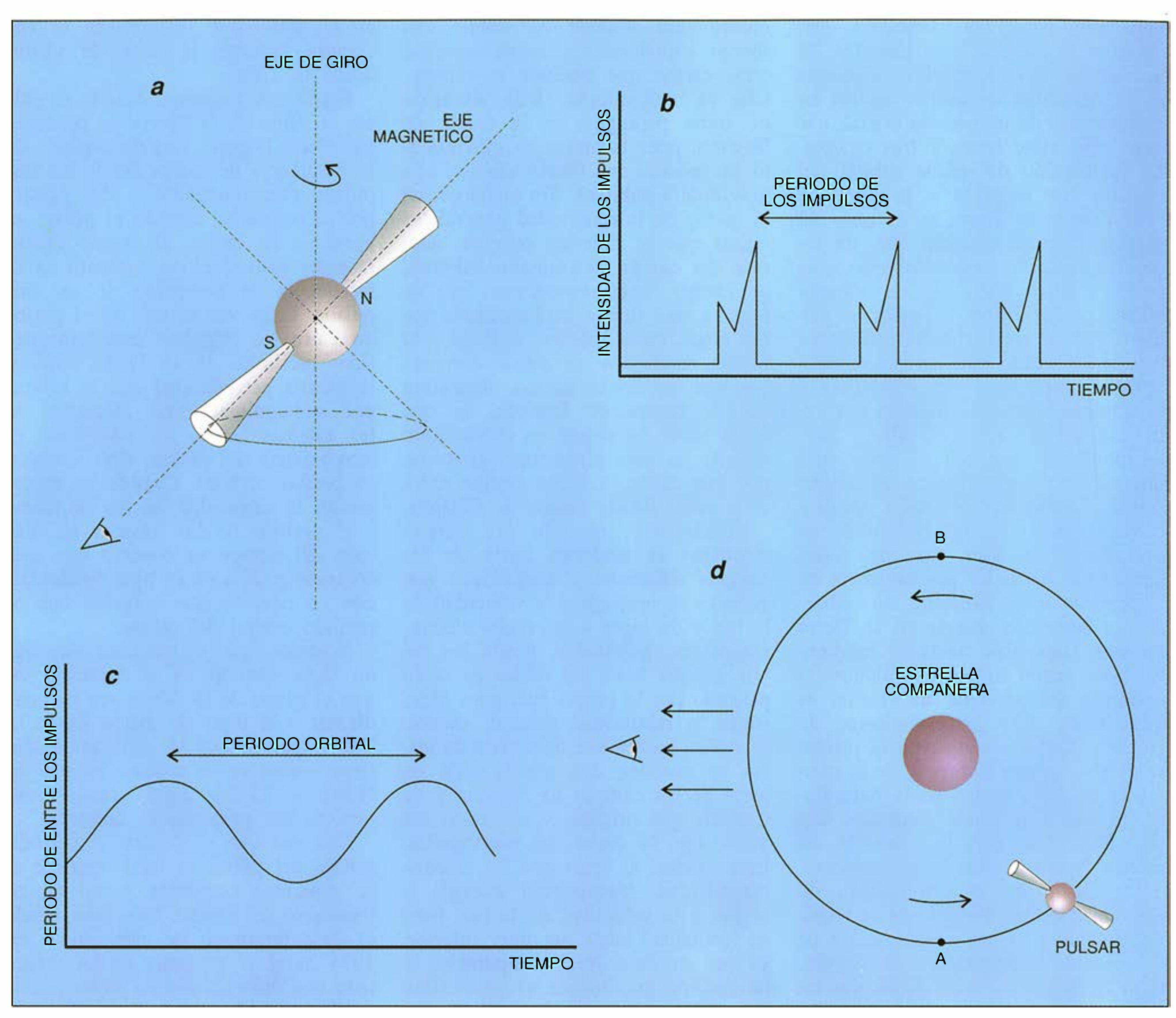
El premio Nobel de física de 1993 ha sido concedido a Russell Alan Hulse y Joseph Hooton Taylor por el descubrimiento y análisis exhaustivo y preciso de un objeto celeste muy singular, el PSR1913+16. El descubrimiento se realizó en el Observatorio Radioastronómico de Arecibo (Puerto Rico) en 1974, durante el desarrollo de la tesis doctoral de Hulse, que dirigía Taylor. La denominación PSR1913+16 significa que se trata de un púlsar situado en un punto de la esfera celeste cuyas coordenadas astronómicas son 19 horas y 13 minutos de ascención recta y 16 grados de declinación norte (positiva). Este lugar pertenece a la constelación del Aguila.

La palabra púlsar es una contracción de la expresión "pulsating star", es decir, estrella pulsante o estrella que emite pulsos. Los púlsares fueron descubiertos en 1967. Se los considera estrellas muy compactas (su densidad es similar a la del núcleo atómico), con una masa que ronda 1,4 veces la del Sol; su tamaño, en consecuencia, es muy reducido: no excede de unas pocas decenas de kilómetros. Tienen dos propiedades importantes que les son características. En primer lugar, giran rápidamente, pudiendo alcanzar una velocidad de rotación de varias centenas de revoluciones por segundo, aunque en el caso del PSR1913+16 de Hulse y Taylor la velocidad es sólo de unas 17 vueltas por segundo, que, sin embargo, es enorme comparada con la vuelta que da la Tierra cada 24 horas o a la que da el Sol cada 25 días aproximadamente. Como es fácil de comprender, estas impresionantes velocidades de rotación sólo son posibles en estrellas que tienen la densidad citada, y por tanto una intensidad del campo gravitatorio en la superficie extremadamente elevada, pues de otro modo se desintegrarían por la simple acción de la fuerza centrífuga.

La segunda propiedad importante de los púlsares es que, lo mismo que la Tierra, poseen un campo magnético, cuya intensidad sobrepasa, sin embargo, lo imaginable; la brújula se orientaría hacia el norte magnético del púlsar a una velocidad asombrosa.

Las dos características descritas provocan que los púlsares emitan, en la dirección de su eje magnético, una intensa radiación electromagnética con un alto grado de focalización, de manera que podemos imaginar que la radiación sale por dos conos muy estrechos orientados según el norte y el sur magnéticos de la estrella. Ahora bien, como en la Tierra, el eje magnético no coincide con el de giro, con lo cual los conos estrechos de radiación describen a su vez un cono en torno al eje de rotación, y, si da la casualidad de que en esta precesión uno de los conos estrechos barre la Tierra, detectaremos una señal electromagnética de tipo impulsivo a cada vuelta de la estrella alrededor de su eje; de ahí le viene el nombre de púlsares a este tipo de estrellas.

Como es natural, la duración y el aspecto del impulso electromagnético recibido en la Tierra dependen, respectivamente, de la abertura y de la forma de los haces de radiación. (Aspecto quiere decir aquí el perfil de la gráfica de la intensidad en función del tiempo). En el caso del púlsar de Hulse y Taylor, la duración del impulso es de 8 milisegundos y su aspecto el de una pareja de montículos muy picudos separados por un valle. Ahora bien, como la estrella da 17 vueltas por segundo, el impulso se repite aproximadamente cada 59 milisegundos.



*Un púlsar emite radiación electromagnética por dos estrechos conos centrados en el eje magnético. Si el eje magnético y el de rotación no coinciden, los conos describen alrededor de éste un movimiento también cónico, y cuando la Tierra cae en la región que barren en su giro, la iluminan periódicamente, impulso a impulso (*a*). La intensidad de los impulsos no es constante a lo largo de su duración; presenta dos picos de altura desigual (*b*). Si el púlsar forma parte de un sistema binario y gira en torno a su compañera describiendo una órbita que por sencillez consideraremos circular (*c*), tampoco será constante el período entre los impulsos: se alargará a medida que el púlsar se aleje de la Tierra (*situación A*), y se acortará a medida que se acerque (*situación B*). Su representación gráfica en función del tiempo (*d*) será una sinusoide, cuyo propio período coincidirá con el de la órbita; basta conocerlo, pues, para conocer éste*

¿Qué es lo que tiene de particular el PSR1913+16 para que sus descubridores hayan merecido el premio Nobel? Al fin y al cabo, ya se conocían bastantes púlsares cuando Hulse y Taylor hallaron el suyo, y desde entonces ha venido aumentando la tasa de detección.

La primera propiedad fundamental del PSR1913+16 es la extraordinaria estabilidad de la duración, aspecto y período de los impulsos electromagnéticos que emite, lo que lo convierte en un reloj de precisión capaz de competir con los mejores relojes atómicos. Esta propiedad no es baladí: el púlsar está seguramente sometido a enormes tensiones centrífugas como consecuencia de la alta velocidad de rotación, y por tanto tiende a sufrir serias perturbaciones en sus características internas; sin embargo, el período entre pulsos sólo aumenta del orden de una millonésima de billonésima de segundo en cada segundo, lo cual da una idea además de la extrema precisión con que se han realizado las mediciones. Además, estos impulsos electromagnéticos son la única información que se recibe de la estrella; por tanto, todos los datos aquí comentados se han construido a partir exclusivamente de ellos.

La segunda característica diferenciadora de PSR1913+16 es que no se trata de una estrella solitaria, como los púlsares que ya se conocían, sino que forma parte de un sistema binario, es decir, de una pareja de estrellas que describen órbitas elípticas en torno al centro de masas del sistema formado por ambas, circunstancia, por otro lado, bastante frecuente en estrellas de tipo corriente.

La presencia de la estrella compañera sólo es detectable gracias al movimiento del púlsar protagonista, ya que no se recibe ninguna señal electromagnética emitida por ella. Se trata probablemente de otro objeto de características similares al púlsar, pero cuyos haces estrechos de radiación no barren la Tierra. Su masa es muy similar a la de PSR1913+16, por lo que las dos órbitas resultan ser tam-

bién muy parecidas, condición que, unida a la elevada excentricidad de las mismas, lleva a grandes variaciones en la velocidad de ambos objetos en el transcurso de un período orbital, que dura unas siete horas y tres cuartos. La inclinación del plano orbital del sistema con respecto a la línea de visión desde la Tierra es de unos 44 grados. Interesa destacar que, de todos los púlsares conocidos, sólo unos pocos forman parte de un sistema binario; el de Hulse y Taylor, el primero que se viese con tal característica, sigue siendo raro en este sentido.

Estas propiedades del PSR1913+16 se complementan de manera tan sutil que, gracias a ellas, Hulse y Taylor pudieron descubrir el rasgo más importante y específico de este objeto celeste: la emisión de *ondas gravitacionales* por el sistema binario donde está integrado. Este tipo de ondas había sido predicho por la teoría de la gravitación de Einstein; sin embargo, su detección directa en la Tierra ha sido imposible hasta el momento, pues según todos los cálculos la radiación que proviene del exterior es debilísima. Las observaciones de Hulse y Taylor constituyen la primera prueba, aunque indirecta, de la existencia de tales ondas en la naturaleza, lo que a mi juicio constituye una magnífica razón para la concesión del premio Nobel a estos investigadores.

La teoría de la gravitación de Einstein, también llamada de la relatividad general, es una generalización de la teoría de la gravitación de Newton, cuyo enunciado esencial afirma que los cuerpos celestes se atraen en razón directa al producto de sus masas y en razón inversa al cuadrado de su distancia. La relatividad general, sin embargo, no se puede resumir de manera tan sencilla y exige el conocimiento de técnicas matemáticas.

No obstante y a los efectos que aquí nos interesan, entenderemos los aspectos más destacados de la manera en que esta teoría generaliza la de Newton, si la comparamos cualitativamente con la teoría electromagnética de Maxwell.

En ésta, los agentes que generan el campo electromagnético son las cargas eléctricas; se dan situaciones distintas si las cargas están en reposo, se mueven con velocidad constante o poseen un movimiento acelerado. En el primer caso, generan un campo eléctrico de tipo culombiano idéntico al gravitatorio de Newton, con que se cambien cargas por masas.

En el segundo caso, cuando las cargas se mueven con velocidad constante, además del campo eléctrico aparece un campo magnético, cuyo efecto más notable es añadir una fuerza suplementaria sobre aquellas otras cargas que también se encuentren en movimiento. Esta situación no tiene parangón en la teoría de Newton, pues la masas en movimiento no generan una fuerza añadida a la gravitatoria habitual. Sin embargo, en el marco de la relatividad general las masas que se mueven generan, además del campo newtoniano habitual, un campo "extranewtoniano" que da lugar a una fuerza suplementaria sobre otras masas móviles análoga a la fuerza magnética; se puede comprobar que es de la misma naturaleza que la fuerza de Coriolis, la que actúa sobre un objeto en movimiento situado en una plataforma giratoria; por esta razón, a dicho campo extra se le suele llamar campo de Coriolis.

Finalmente, cuando las cargas eléctricas se aceleran, parte de los campos eléctricos y magnéticos que generan se propaga a la velocidad de la luz y da lugar a las ondas electromagnéticas habituales, desde los rayos gamma hasta las ondas de radio pasando por la propia luz; pues bien, según la relatividad general, cuando se acelera fuertemente un sistema de masas se produce una propagación de parte de los campos de Newton y de Coriolis que origina, y se genera un nuevo tipo de ondas, las gravitatorias. Estas ondas, al igual que las electromagnéticas, transportan energía y viajan a la velocidad de la luz, pero su intensidad suele ser muy inferior, ya que en situaciones comparables la interacción gravitatoria es muchísimo más débil que la electromagnética.

Como ya se ha indicado, los componentes del sistema binario PSR1913+16 sufren fuertes aceleraciones en su movimiento; por lo cual, de acuerdo con lo expuesto en el párrafo anterior, deben emitir energía en forma de radiación gravitatoria. Ahora bien, si esto es cierto, la pérdida de energía correspondiente se traducirá en una aproximación de las órbitas de los componentes del sistema y, consecuentemente, en una disminución de sus períodos orbitales.

Hulse y Taylor midieron esa disminución, y obtuvieron resultados acordes con las predicciones de la relatividad general. Quedó así de manifiesto la emisión de ondas gravitatorias.

El mecanismo mediante el cual se realizó la medición es muy interesante. Para describirlo, simplificaremos la situación imaginando que la masa de la estrella compañera del púlsar es muy superior a la de éste, tanto, que permanece quieta y el púlsar describe una órbita a su alrededor. Supondremos, además, que esta órbita es circular y que en el plano que la contiene se encuentra también la línea de visión desde la Tierra.

Según este esquema, cuando el púlsar se aleja de la Tierra se produce, por efecto Doppler, una disminución de la frecuencia de recepción de los impulsos electromagnéticos del púlsar; por el contrario, cuando el púlsar se acerca a la Tierra, el mismo efecto Doppler provocará un aumento en la frecuencia de recepción de los impulsos. Estas variaciones en el período entre los impulsos electromagnéticos recibidos en la Tierra tendrán la misma periodicidad que la órbita; por consiguiente, una medición de las mismas indica no solamente el movimiento del púlsar, sino también su período orbital. Cuando se representan la intensidad de los impulsos y el período de los mismos en función del tiempo se observa que esta segunda gráfica es de tipo sinusoidal, con un período que coincide con el período orbital del púlsar.

Notemos que el proceso descrito no tiene sentido en el supuesto de que el plano de la órbita sea perpendicular a la línea de visión desde la Tierra, por lo que la inclinación que tiene realmente el sistema binario de Hulse y Taylor debe considerarse otra de sus propiedades notables.

Una vez que se conoce el período orbital del púlsar es fácil verificar si se mantiene constante o no en el transcurso del tiempo. Pues bien, desde el descubrimiento de este objeto en 1974 hasta el presente se ha detectado una disminución en dicho período de unos 14 segundos, cantidad que concuerda de manera impresionante con la predicha por la teoría de Einstein.

Las observaciones de Hulse y Taylor constituyen un ejemplo de investigación experimental de alta precisión y con una proyección teórica de gran alcance, pues coloca la última guinda que le faltaba a la teoría de la relatividad general de Einstein. Además, a mi juicio, reafirman las esperanzas depositadas en el éxito futuro del proyecto de construcción de detectores interferométricos de ondas gravitatorias, que sin duda abrirán el paso a la astronomía gravitatoria, es decir, la observación del cosmos mediante este tipo de ondas, en sustitución de las electromagnéticas.

Este avance, si se produce, permitirá el acceso a una información inédita del universo; las ondas gravitacionales no se detienen ante casi ningún obstáculo interpuesto entre la fuente y el detector, mientras que las ondas electromagnéticas son absorbidas en buena medida por todos los objetos celestes. (*Jesús Martín, de la Universidad de Salamanca*)

Micropaleontología

Virus de la varicela

Los arqueólogos moleculares se llevaron las manos a la cabeza cuando vieron que en la versión cinematográfica del *Parque jurásico* de Michael Crichton salían dinosaurios clonados a partir de las últimas comidas de unos mosquitos enterrados en ámbar. El ADN antiguo estaría demasiado estropeado, dijeron; tardarían siglos en recomponerlo. Además, el genoma reconstruido tendría un sinfín de errores. En resumidas cuentas: que la extinción es un proceso sin retorno.

No comparten esa opinión George O. Poinar, Jr., entomólogo, ni Raúl J. Cano, experto en microbiología, quienes han secuenciado el ADN de un escarabajo de la madera que llevaba incrustado en ámbar más de 120 millones de años, desde el Jurásico. Es el ADN más antiguo que haya sido secuenciado. Creen que es posible resucitar organismos, aunque mucho más simples que un *Tyrannosaurus rex;* por ejemplo, virus o bacterias. "Nos falta muy poco para reconstruir el gen de una especie de bacilo que vivió en el intestino de una abeja sin aguijón hará 40 millones de años", dice Cano, de la Universidad Politécnica de California en San Luis Obispo. "Hay que ir poniendo los genes en una especie viva segmento a segmento, hasta que no quede rastro del ADN moderno."

El gen bacteriano, cuyo nombre es 16S ARNr, interviene en la producción de ribosomas. Hasta el momento, confiesan, han ensartado 1300 bases de nucleótidos de un total de unas 1500. Reconocen que algunos genes son más difíciles de reconstruir, pero, afirman, en unos pocos años se podría obtener el genoma completo de una bacteria.

Pero que una antigua bacteria retorne a la vida quizá no sea tan sencillo. Michael A. Goldman, de la Universidad de San Francisco, señala que el ADN bacteriano forma bucles con carácter de cuasicromosomas. Además, las bacterias legan a sus células hijas no sólo ácidos nucleicos sino también proteínas, y éstas pueden influir en la expresión de determinados genes.

"Esperamos dedicarnos muy pronto a distintos tipos de virus", dice Poinar, de la Universidad de California en Berkeley. Los más pequeños poseen genomas no mayores que un gen de tamaño grande, y puede lograrse su replicación sin proteínas auxiliares. No hay más que insertar el ADN vírico desnudo en una célula huésped; ésta producirá entonces partículas víricas completas. Los expertos en evolución vírica admiten la viabilidad del procedimiento. "¿Virus jurásicos? Sin duda", dice Stephen S. Morse, de la Rockefeller.

El problema estriba, desde luego, en aislar un virus antiguo. No se conocen virus fósiles, pero con las nuevas técnicas de multiplicación enzimática quizá se puedan exprimir restos antiguos hasta sacar de ellos viejos virus. "No hay objeción teórica contra la resurrección de un virus, pero cuesta obtener el suficiente ADN", aclara Peter M. Palese, de Monte Sinaí. Palese y otros andan tras una presa más escurridiza: el virus que ocasionó la pandemia gripal de 1918. Este trabajo es particularmente difícil porque los genes están codificados en ARN, molécula menos estable que la de ADN.

Los virólogos quieren saber más de la cepa de 1918 porque, en principio, una pandemia así podría volver a repetirse. Hasta hace poco tenían que trabajar de manera indirecta, bien infiriendo la estructura vírica a partir de los anticuerpos producidos por los supervivientes de la infección, bien por extrapolación de los genomas de muestras víricas recientes. Walter M. Fitch, de la Universidad de California en Irvine, ha seguido la segunda vía: ha trazado la trayectoria evolutiva de la gripe en los seres humanos y en los cerdos, y ha llegado al descubrimiento de que las cepas divergieron hacia 1918, fecha de su último antepasado común.

Aunque Fitch cree haber reconstruido el genoma del ancestro, dice que habría que revisar su resultado mediante la secuenciación directa del virus de 1918.

Otro objetivo lógico es el retrovirus VIH, causante del sida. "Se puede ir a los museos y seleccionar tejidos humanos conservados en el siglo XIX, cuando se empleaba alcohol en vez de formaldehído", dice Morse. "Sabemos que en aquella época algunas enfermedades mataban rápidamente. La tisis galopante no era muy distinta de la tuberculosis de quienes sufren el sida, así que quizá se tratase de personas afectadas por el síndrome a las que mataba una infección secundaria."

Sin embargo, hasta ahora, el único ARN vírico que procede de restos humanos antiguos es el de los genes retrovíricos endógenos, así llamados porque se integraron en los cromosomas humanos mucho antes de que evolucionara el *Homo sapiens.* Jaap Goudsmith y sus colegas del Hospital Clínico de Amsterdam señalan que una momia egipcia de más de 5000 años de antigüedad ha producido trazas de un retrovirus endógeno humano de tipo C. Estudios más recientes en monos momificados arrojaron resultados similares.

No parece que a los microbiólogos les preocupen demasiado las consecuencias que el perturbar el sueño de gérmenes que no estén muertos podría tener. La mayoría de los microorganismos son inocuos, y pocos laboratorios hay que alojen gérmenes patógenos. Pero el riesgo existe. "Lo que no era sino un microbio sin importancia en el tiempo de las momias pudiera hoy ser letal", señala Goldman. *(Philip E. Ross)*



Raúl J. Cano sostiene un insecto incrustado en ámbar

De cerca

Fotos y texto: Kōji Nakamura

Danza mortal del arlequín

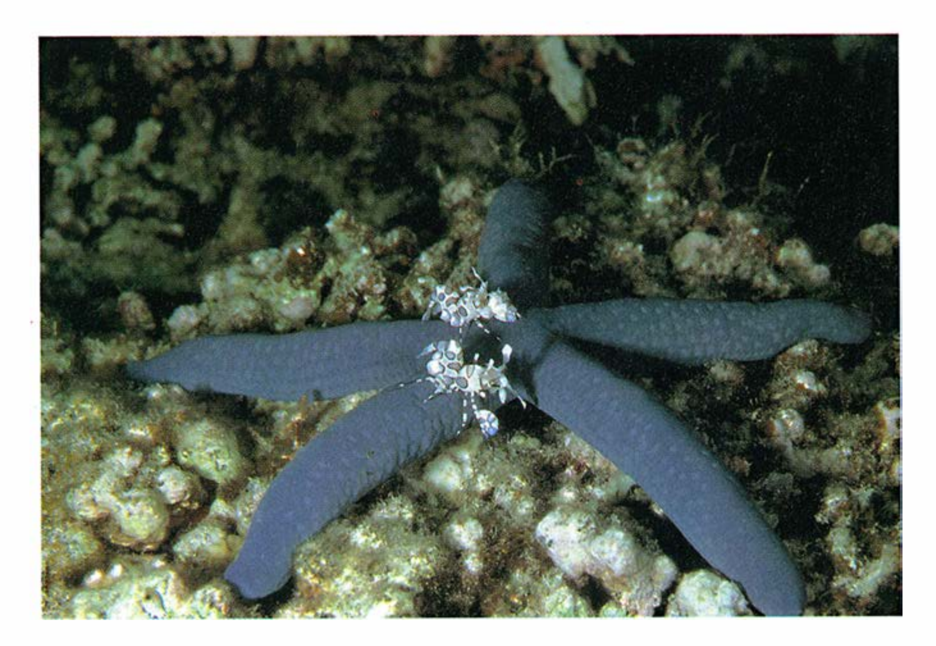
Linneo situaba los crustáceos entre los insectos. No mucho después, en la segunda mitad del siglo XVIII, todavía se preguntaba Charles Bonnet, en su deliciosa *Contemplación de la naturaleza*, si los cangrejos constituían una rama de los moluscos. Y respondía con humildad: no lo sé. Para añadir que los vínculos entre especies son muy sutiles, y a nosotros sólo nos está reservado percibir las afinidades más palmarias.

Cruzaban por mi mente esos y otros recuerdos de viejos anaqueles naturalistas mientras contemplaba las idas y venidas de unos arlequines por entre las anémonas. Parecía un juego de colores en un jardín submarino. De ese soliloquio interior me sacó una escena del más puro drama darwinista. Con sus cinco centímetros escasos paseábase otro arlequín sobre el dorso irregular de una estrella de mar. Pero no era ningún movimiento pacífico. La daga de sus pinzas arrancó la dura epidermis del asteroideo y le cortó los brazos.

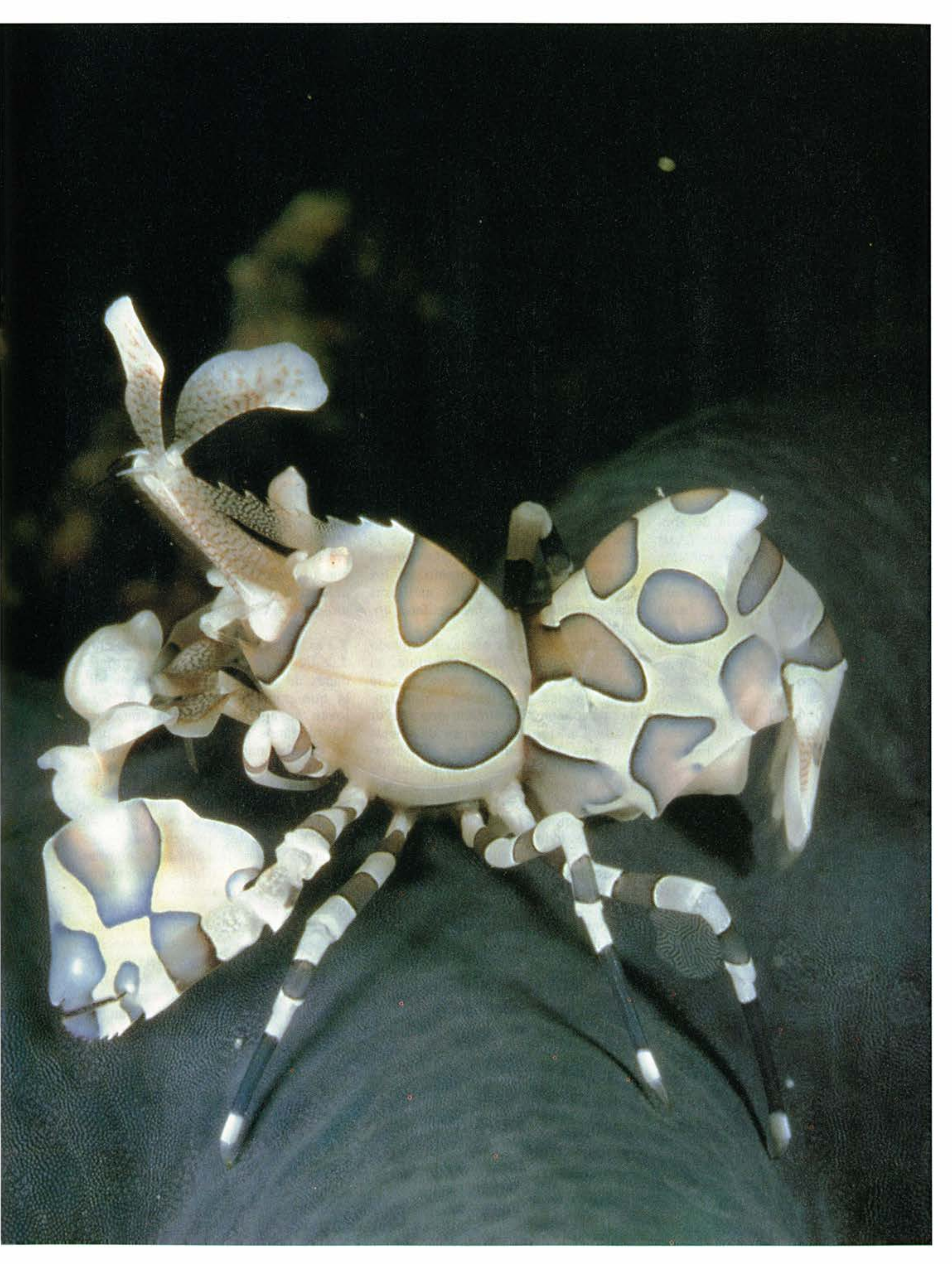
Ocurrió en Okinawa, de triste memoria para la historia reciente de mi pueblo. Quizá, pensé, en el bentos privilegiado de su mar la lucha es allí más limpia, pues sólo se pelea para poder seguir viviendo.

Foto de la izquierda
distancia focal: 55 mm
diafragma: F = 6
tiempo de exposición: 1/60 segundos
película: ISO = 25

Foto de la derecha
distancia focal: 16 mm
diafragma: F = 8
tiempo de exposición: 1/60 segundos
película: ISO = 25







Dispersión de las abejas africanizadas

Las abejas melíferas africanizadas se extienden desde Argentina hasta los Estados Unidos. Para conjurar sus estragos, se hace imperiosa una política de control e hibridación con otras especies menos agresivas

Thomas E. Rinderer, Benjamin P. Oldroyd y Walter S. Sheppard

En octubre de 1990, las abejas melíferas africanizadas cruzaron la frontera mexicana y penetraron en territorio estadounidense. Venían precedidas por relatos sensacionalistas que hablaban de abejas asesinas de personas y animales. Menos de 35 años después de que miembros de una subespecie de abeja melífera que vive en Africa *(Apis mellifera scutellata)* fueran soltados en las afueras de São Paulo, sus descendientes (las abejas africanizadas) habían migrado hacia el norte, hasta alcanzar el sur de Texas. En la actualidad, ocupan un área de distribución de unos 20 millones de kilómetros cuadrados, que abarca gran parte de Sudamérica y Centroamérica casi entera. Su dispersión continúa. El año pasado arribaron a Arizona, y es de esperar que sigan colonizando los Estados Unidos meridionales antes de que los límites climáticos las frenen, probablemente hacia el año 2000.

Su llegada plantea muchas preguntas. ¿De qué modo influirán en la salud pública y en la apicultura? Para empezar, ¿por qué se llevaron abejas africanas a América? ¿Qué permitió que su progenie tuviera un éxito tan extraordinario? Y, lo que es más importante, ¿puede hacerse algo para amortiguar el impacto de la colonización por abejas africanizadas? Lo mismo que otros investigadores, hemos dedicado nosotros parte notable de nuestra tarea a la última cuestión. Este trabajo, en particular la investigación sobre la constitución genética de los insectos que se dirigen a los Estados Unidos, ofrece la esperanza de que el empeño puesto en controlar el apareamiento en los apiarios entre las abejas melíferas africanizadas y las abejas melíferas comunes resulte eficaz.

THOMAS E. RINDERER, BENJAMIN P. OLDROYD y WALTER S. SHEPPARD han cooperado en trabajos de campo y estudios de laboratorio. Rinderer dirige el laboratorio de cría, genética y fisiología de la abeja melífera que el Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos tiene en Baton Rouge. Oldroyd trabaja como genético en la Universidad de La Trobe. Sheppard, entomólogo del Servicio de Investigación Agrícola, se ha especializado en las bases moleculares de la genética cuantitativa y la evolución de las abejas melíferas.

La llegada de las abejas ha dejado sentir un primer efecto tangible, el de la preocupación creciente por la salud pública. Las abejas africanizadas defienden su colmena con mayor resolución que las estirpes de abejas melíferas norteamericanas. Descienden estas últimas de subespecies de *A. mellifera*, bastante pacíficas, importadas de Europa cuando los primeros colonos observaron que el Nuevo Mundo carecía de abejas melíferas nativas. En comparación con las abejas europeas, las que presentan caracteres africanos se excitan más fácilmente y muestran mayor propensión a aguijonear a cuantos, animales o humanos, parezcan amenazar su nido. Pueden atacar también en masa (por millares) y persistir durante más tiempo en la agresión (durante horas).

Hay ya una muerte oficial por esa causa en los Estados Unidos y quizá 1000 en el hemisferio occidental. La cifra de bajas entre los animales domésticos es muy superior. Por suerte, la mayoría de las personas no alérgicas sobreviven al ataque si pueden huir y limitar así el número de picaduras que sufren. Casi todas las víctimas humanas por causa de las abejas melíferas africanizadas murieron al no poder escapar, ya fuera porque cayeron y se hirieron o quedaron atrapadas de cualquier forma.

Además de plantear un problema de salud pública, las abejas constituyen una amenaza contra el medio de vida de miles de apicultores y campesinos. Los apicultores disponen las colmenas en campo abierto, lo que facilita que las abejas reinas europeas se apareen con zánganos africanizados (machos) e introduzcan, en consecuencia, niveles crecientes de agresividad defensiva y otros rasgos costosos y molestos en las colonias apiares.

Las preferencias de apareamiento de la reina explican las propiedades de una colonia, porque es ella la que pone los huevos. Cuando es joven se aparea en vuelo con unos 15 zánganos de otras colonias, para no copular nunca más. Si la colonia necesita abejas, la reina pone huevos en celdillas individuales. De los huevos fecundados nacen las obreras: hembras que portan cromosomas de cada uno de los progenitores y se encargan de traer comida y guardar el nido. (Pero si la larva que emerge de un huevo fecundado recibe una dieta especial, puede convertirse en una reina.) De los huevos sin fecundar salen los zánganos; estos machos portan una única dotación de cromosomas (procedentes de la madre), y mueren después de la cópula.

Si los apicultores se muestran incapaces de controlar la transmisión de rasgos indeseables por el aparea-

1. ABEJAS AFRICANIZADAS alertadas ante la presencia de un intruso cerca de su colmena; nos lo indica la postura erguida del ejemplar de la derecha. Estas abejas, cuyo aspecto es casi idéntico al de otras melíferas, descienden de *Apis mellifera scutellata*, subespecie que, en 1956, fue introducida en Sudamérica desde Africa.

miento entre reinas europeas y zánganos africanizados, mermarán sus beneficios; en parte porque habrán de adoptarse medidas para proteger a los trabajadores de las colmenas y al público contra las picaduras. En esa situación, en efecto, los apiarios deberán trasladarse a zonas despobladas, y habrá que blindar a los operarios con pesadas indumentarias. Las africanizadas, además, suelen abandonar las colmenas mucho antes que las europeas; repoblar las colmenas puede resultar caro.

Por si fuera poco, los apicultores podrían ver cómo baja su producción de miel, que en la actualidad supone del orden de 80 millones de kilogramos anuales (de cuya venta sacan unos 100 millones de dólares). Muchos estudios sugieren que, en las condiciones climáticas y ecológicas que fomentan la producción abundante de miel por parte de las abejas europeas, las africanizadas rendirían bastante menos.

De entrada, los apicultores que alquilan sus colonias a los agricultores para la polinización de almendros, arándanos, manzanos, pepinos y otros cultivos tendrán que contar con pérdidas financieras adicionales. Los alquileres generan anualmente unos ingresos de 40 millones de dólares, que recaen, en buena parte, en los bolsillos de apicultores trashumantes, dedicados al traslado en camiones de miles de colonias hasta puntos muy alejados entre sí. Además de vigilar que no ataquen a la gente, los apicultores que mantuvieran muchas abejas africanizadas podrían encontrarse con la prohibición de llevar sus insectos a zonas exentas de abejas africanizadas.

Mayor gravedad reviste el riesgo que se cierne sobre los agricultores, que confían en los servicios de polinización para sus cultivos valorados en 10.000 o 20.000 millones de dólares. Sus costes aumentarían porque la protección del público les exigiría adquirir los servicios de un reducido número de apicultores, aquéllos de los que se supiera que trabajan con cepas europeas; estos apicultores se verían obligados a recorrer mayores distancias o aumentar su precio, considerando los gastos implícitos en mantener sus apiarios bajo control y en conseguir la certificación de su éxito.

Las preocupaciones actuales son fruto de una desgraciada serie de acontecimientos que empezaron a mediados de la década los cincuenta, cuando el gobierno del Brasil decidiera fomentar su industria apícola. Por aquel tiempo, las abejas melíferas europeas formaban la base de una apicultura industrial, consolidada en muchos lugares pero no en el Brasil. El magro sector apícola de este país debíase, en parte, a su clima tropical, muy duro para las abejas melíferas europeas. Las colonias apenas sobrevivían en la naturaleza, si es que lo conseguían; para mantener colonias durante todo el año, los apicultores debían invertir un esfuerzo desproporcionado.

Sabemos ahora que el bajo rendimiento de las abejas europeas tenía que ver con su interpretación errónea de las señales ambientales correspondientes a la reproducción. Según han puesto de manifiesto estudios directos e indirectos de genética, las abejas europeas, así como todas las subespecies de *A. mellifera*, remontan su origen a una especie asiática que adquirió la capacidad de regular la temperatura corporal y sobrevivir en un clima templado. Para resistir el frío, las abejas, amén





2. MIGRACION DE ABEJAS MELIFERAS AFRICANIZADAS desde los alrededores de São Paulo hasta los Estados Unidos; se realizó en menos de 35 años. (Las líneas rojas señalan los puntos de detección más alejados en los años indicados.) Los insectos alcanzaron el extremo meridional de Texas el 15 de octubre de 1990, y fueron avistados en Arizona en 1993.

de formar enjambres que se amontonaban en nidos resguardados, comían reservas de miel que habían recolectado en las estaciones cálidas. Con el tiempo, expandieron su área de distribución, hasta abarcar Asia Menor, Europa y Africa, y acabaron por diversificarse en 20 o más subespecies adaptadas a determinados ambientes locales.

En el decurso de la evolución, el comportamiento de las subespecies europeas quedó ligado a las fluctuaciones estacionales de la longitud del día. Cuando las horas de luz aumentan, anunciando la inminente aparición de las flores, las colonias de la melífera europea agrandan sus poblaciones de obreras; serán, pues, muchas las que partan para recolectar polen y néctar llegada la floración. El néctar, que contiene una gran cantidad de azúcar, es convertido en miel, una fuente básica de energía.

La vinculación del ciclo biológico a la longitud del día da buenos resultados en las regiones templadas; pero no en Brasil, donde la duración del día guarda escasa relación con la disponibilidad de polen y néctar. Los períodos de lluvia que se requieren para la producción abundante de flores no coinciden necesariamente con períodos de luz diurna prolongados; lo que significa que las colonias europeas se sentirán estimuladas para propagarse, aun cuando los recursos alimentarios, escasos, no puedan abastecer poblaciones grandes.

En 1956, la solución para los males de la apicultura brasileña parecía residir en la importación de una variedad de abeja melífera acostumbrada al trópico. El gobierno autorizó a Warwick E. Kerr, de la Universidad de São Paulo en Piracicaba, la adquisición, para su estudio, de algunos ejemplares de *A. m. scutellata* procedentes de las tierras altas de Africa oriental y austral. Kerr se hizo con 170 reinas, aunque sólo sobrevivieron 46 de Africa del Sur y otra de Tanzania, tras el viaje de Sudáfrica a Río Claro, un apiario de investigación a unos 160 kilómetros de São Paulo. Las hembras escogidas habían copulado ya con zánganos africanos; estaban, pues, listas para poner los huevos precisos e inaugurar nuevas colonias.

En 1957, apenas transcurridos algunos meses de la instalación de las colonias africanas, un visitante del apiario experimental levantó las pantallas de la entrada de las colmenas que impedían la huida de las reinas. Se ignora la razón de ese comportamiento, pero antes de que se descubriera el hecho veintiséis colonias habían abandonado las colmenas con sus reinas. Se supuso, durante años, que las colonias liberadas habían sido las fundadoras de toda la población africanizada. Nos acabamos de enterar, sin embargo, de que, al poco de la suelta, se distribuyeron entre los apicultores brasileños reinas criadas en las restantes colonias. Las escapadas adicionales coadyuvaron a que hubiera suficientes insectos africanos disponibles para establecer poblaciones silvestres de abejas melíferas africanizadas en Brasil.

Las abejas liberadas y sus descendientes encontraron en Brasil un lugar acogedor. Medraron. Comparadas con las abejas europeas, las recién llegadas estaban mejor capacitadas para percibir los estímulos de reproducción a partir de las variaciones de lluvias y flores y venían mejor equipadas para resistir las estaciones secas. Cuando abundan las flores, las abejas se dedican al desahijamiento o enjambrazón reproductora: la reina y una cifra notable de miembros de la colmena parten para establecer una nueva colonia, que crecerá. En la colonia original queda una joven reina, que repuebla la colmena. Cuando merman los recursos florales, las abejas africanizadas se amadrigan: reúnen la miel por consumir y abandonan la colmena en masa, en busca de un lugar más acogedor. (Las abejas europeas, en cambio, enjambran quizás una vez al año y raramente se amadrigan.)

Mientras se iban afianzando en el Brasil, las africanizadas se propagaron en todas las direcciones, por zonas incluso donde se desconocía la apicultura. Con los años sesenta comenzaron a difundirse los primeros informes sobre la acerada defensa de sus nidos y las molestias que podrían generar.

Hacia 1972, el gobierno de los Estados Unidos se ocupó del impacto potencial de las mismas. Se descubrieron motivos para la preocupación. Podía trabajarse con las abejas del sur del Brasil, pese a su agresividad nor-

mal; los colmenares anteriores a la liberación de las africanas continuaban teniéndola. Pero las abejas del norte (las comprometidas en la trayectoria de avance hacia a los Estados Unidos) manifestaban una agresividad insoportable. No era de sorprender que el norte del Brasil, de pobre tradición apícola antes de la inmigración africanizada, siguiera en la misma escasez. Estudios posteriores, congruentes con los hallazgos septentrionales, revelaban que las abejas africanizadas que habían penetrado en Venezuela y más arriba conservaban su fuerte propensión a picar. También retenían su tendencia a enjambrar y amadrigarse con frecuencia.

A mediados de los ochenta, el gobierno de los Estados Unidos, en cooperación con el de México, decidió retardar la propagación de las abejas hacia los Estados Unidos mediante la creación de una "zona de seguridad". Se trataba de descubrir y eliminar los enjambres que llegaran a las regiones de México de paso obligado para dar el salto a los Estados Unidos. En combinación con el tiempo meteorológico, adverso para la migración, el programa (de dificultades de ejecución no previstas) demoró cierto tiempo la presencia de las abejas en tierras estadounidenses. Pero no podían ponerse puertas al campo, es decir, detenerlas en bloque.

Contemporáneamente, los brasileños lograban encauzar las abejas africanizadas hacia el fin previsto, el del fortalecimiento de la apicultura nacional. Ante el abandono de muchos, el gobierno se embarcó en una campaña educativa destinada a los apicultores; recomendó también, con carácter general, las medidas adecuadas para evitar las abejas y librarse de los ataques. Fruto de aquello es la nueva generación de apicultores; y en zonas del país donde antaño se morían las abejas europeas, la gente vive ahora del cuidado de la cría de las africanizadas y de la recolección de su miel. Con técnicas de mejora animal, se mantienen niveles razonables de agresividad en las poblaciones, matando las reinas de las colonias hiperagresivas o de escaso rendimiento.

Los Estados Unidos tienen poco que ganar con la colonización por abejas africanizadas. Por eso, la entrada de éstas en Texas y Arizona añade apremio a la cuestión sobre la posibilidad o no de bloquear la introducción de rasgos africanos en los apiarios y en la naturaleza. Cabría, en principio, confiar en dos estrategias principales. Los apicultores podrían proteger en cierta medida sus poblaciones mediante la sustitución frecuente de las reinas; para ello se requiere que las colonias acepten reinas sustitutas, escogidas por el apicultor entre las ofrecidas por los criadores. Los apicultores asegurarían así que sus reinas fueran europeas y (si lo desean) que se hubieran ya apareado con zánganos europeos. Es una práctica que han iniciado muchos apicultores, para aumentar la producción de descendientes (al reemplazar a las reinas viejas y menos productivas con otras nuevas) o para controlar la constitución genética, y con ello las características, de las poblaciones de las colmenas.

La segunda estrategia protectora, de inundación de zánganos, consiste en mantener un gran número de zánganos europeos en zonas de cría industrial donde se aparean las reinas. Aun cuando esas áreas hayan sido invadidas por inmigrantes africanizados, el enorme número de machos europeos asegurará que las reinas europeas se apareen, casi exclusivamente, con estos últimos.

La misma abundancia de abejas europeas reforzará la probabilidad de que las reinas africanizadas den también en aparearse con zánganos europeos. Si las reinas de generaciones subsiguientes continuaran después apareándose con zánganos europeos, el acervo génico de las poblaciones de abejas en las áreas afectadas sería, sobre todo, de ADN europeo, y europeos serían, en consecuencia, los caracteres predominantes. A la larga, esos híbridos pacíficos podrían constituir un beneficio. De acuerdo con ciertos trabajos, las abejas africanizadas pueden resistir mejor el parasitismo y las enfermedades. Si los programas de cría lograran domeñar esas ventajas, las abejas norteamericanas podrían luchar con éxito contra la creciente invasión de ácaros.

La estrategia de la inundación de zánganos supone que las abejas melíferas que portan genes africanos y las de genoma europeo puedan cruzarse y engendrar descendientes viables, dotados de genes y rasgos de ambos progenitores. Pero, ¿pueden hibridarse? Hubo, durante mucho tiempo, serias dudas. Ciertos estudios, realizados en los años ochenta sobre morfología de las abejas que vivían en zonas invadidas por descendientes de *A. m. scutellata*, parecían indicar que se estaban produciendo casos de hibridación, afirmación respaldada por el análisis enzimático. Pero otras investigaciones discrepaban.

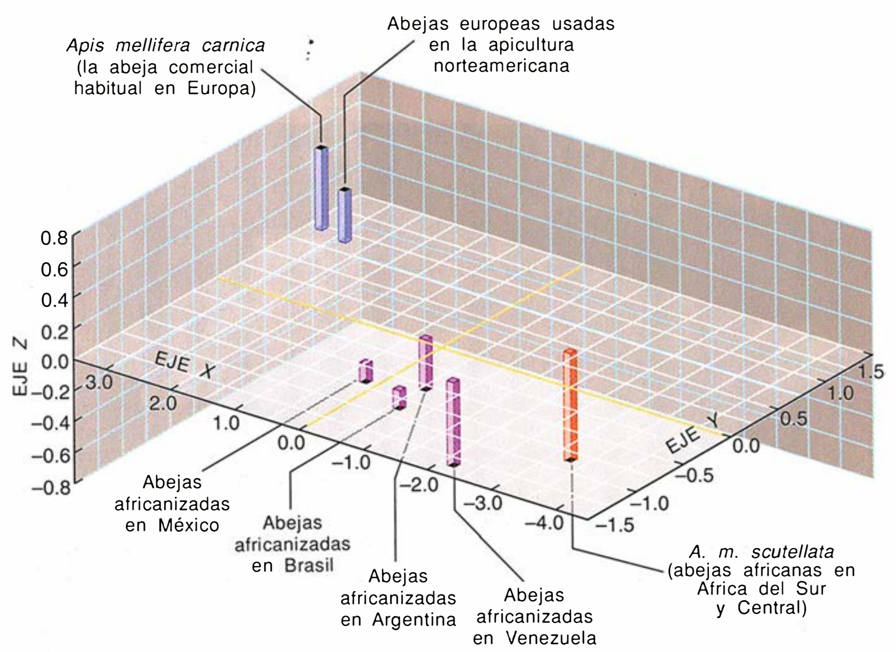
La morfología comparada reviste mayor dificultad de lo que, en principio, pudiera parecer; incluso en el caso de cotejo entre extremos (abejas africanas que viven en Africa y europeas que viven en Europa), uno y otro grupo guardan estrechas semejanzas. Sí podemos, en cambio, distinguir entre colonias mediante análisis discriminante multivariante, procedimiento estadístico en el



3. INDUMENTARIA PROTECTORA, esencial para quienes trabajan en colmenas de abejas africanizadas. Comparadas con las estirpes pacíficas de abejas melíferas comunes (originarias de Europa), las africanizadas se excitan con mucha mayor facilidad. Poblaciones enteras de colmenas pueden aparecer de pronto, listas para perseguir obstinadamente y aguijonear a quienquiera que perciban como intruso.



4. MELONAR (*en primer término*) **junto a una zona residencial en el norte de California. Sus plantas van a ser polinizadas por abejas melíferas europeas alojadas en las cajas inmediatas. A medida que las abejas africanizadas se instalen en los Estados Unidos, a los agricultores les va a ser más difícil encontrar abejas europeas que alquilar para polinizar y tendrán que pagar más por las que estén disponibles. Por esta y otras razones, la incursión de abejas africanizadas podría reducir los beneficios anuales de apicultores y agricultores.**



5. MEDIDAS DE CARACTERISTICAS FISICAS en abejas melíferas europeas, africanas y africanizadas, resumidas en este gráfico tridimensional. Los ejes representan las medidas obtenidas para distintos grupos de rasgos. Una base de cada columna se encuentra sobre el piso formado por los ejes ***x*** **e** ***y*****. El extremo opuesto de la columna (*****de color negro*****), que se encuentra por encima o por debajo del piso, señala la intersección de las coordenadas** ***x*****,** ***y*** **y** ***z*****; esta base representa la morfología global del grupo. La morfología de las abejas africanizadas (*****púrpura*****) se encuentra entre la de las abejas europeas (*****azul*****) y africanas (*****rojo*****), lo que sugiere que las abejas africanizadas son el subproducto del apareamiento entre abejas europeas y africanas en América.**

que se miden la longitud y anchura de las alas y de los segmentos de las patas, así como los ángulos en que las venas se intersecan en las alas, entre otras magnitudes corporales. Aunque los valores medios para las muestras europeas y africanas no difieran significativamente en un parámetro, al combinar las medias de grupos para diversas magnitudes podemos percibir las diferencias globales reales.

Para corroborar que las abejas invasoras en Centroamérica y Sudamérica diferían físicamente de *A. m. scutellata* (prueba de la realidad de la mezcla genética), comparamos sus resultados finales con los obtenidos para abejas europeas y africanas. La comparación reveló que las poblaciones ferales de México, Brasil, Argentina y Venezuela se parecían en grado diverso a las abejas europeas y africanas, aunque eran más afines a las abejas africanas.

En el mismo orden, y para Norteamérica, cuando anotamos en un gráfico las medidas sumadas para tres grupos diferentes de características, en función de tres ejes respectivos, el punto que representaba a las abejas africanas puras quedó lejos del que representaba a las abejas europeas puras [*véase la figura 5*]. Los puntos que simbolizan las abejas de México, Brasil, Argentina y Venezuela se dispusieron entre los anteriores, aproximadamente a un tercio de la distancia entre los dos extremos, aunque sesgado hacia el valor africano. De esos datos se infiere que las poblaciones que avanzan hacia los Estados Unidos no pertenecen a una población africana pura del Viejo Mundo, sino que se trata de híbridos que han adquirido algunos genes europeos en sus correrías.

Pero los datos morfológicos admitían otras interpretaciones. En primer lugar, la presencia del efecto fundador: quizás el menguado número de abejas africanas que se trajeron a Brasil portaban genes que las asimilaban a las europeas; en este caso, su progenie en América mostraría un parecido físico con las abejas europeas, incluso en ausencia de hibridación. En segundo lugar, la selección natural operada en América: habría favorecido la supervivencia de abejas africanas que, por casualidad, tuvieran rasgos físicos próximos a los de las abejas europeas.

El atractivo que tales explicaciones pudieran encerrar se desvaneció cuando los datos procedentes de los análisis multivariantes se combinaron con los resultados de enzimología comparada. El equipo de Jorge A. Lobo, de la Universidad de São Paulo en

Ribeirã Prêto, sabía que el 98 por ciento de las abejas africanas portan un alelo que determina la deshidrogenasa del ácido málico. Sabía también que este mismo alelo (y, por tanto, la isozima, o variante enzimática, que codifica) es mucho más raro en las abejas europeas. Cuando el grupo investigó las formas de deshidrogenasa del ácido málico en las abejas del Brasil, dedujo que sólo del 70 al 80 por ciento de los insectos albergaba el alelo común en las abejas africanas. Estudios de otras isozimas obtuvieron un patrón similar. Infirieron así que algunas abejas africanizadas, por lo menos, procedían de hibridación. Cuesta admitir que las diferencias morfológicas e isozímicas entre africanizadas y africanas del Viejo Mundo sean resultado del puro azar.

Pero otras observaciones contradecían los descubrimientos que abonaban la hibridación. En particular, las abejas de áreas colonizadas evidenciaban rasgos nítidamente africanos: comportamiento de defensa muy agresivo y enjambramiento y amadrigamiento frecuentes. Si se produjo la hibridación, no se manifestaba en la conducta. Los primeros estudios genéticos directos plantearon dudas de idéntico tenor. Se comparó el ADN mitocondrial de abejas de áreas colonizadas con el de abejas africanas y europeas. Las mitocondrias contienen pequeños anillos de ADN que difieren del ADN cromosómico que se encuentra en el núcleo. El ADN nuclear dirige la aparición de caracteres físicos y de comportamiento. El ADN mitocondrial proporciona alrededor de una docena de genes que se requieren para la producción de energía. La mayoría de las especies animales (incluidos los seres humanos) heredan sus mitocondrias, y con ellas el ADN mitocondrial, exclusivamente de la madre.

Las abejas africanas difieren ligeramente de las europeas en la secuencia de nucleótidos del ADN mitocondrial. Así, mediante la identificación de marcadores de los segmentos de ADN variables de abejas de las áreas africanizadas, se pudo remontar en el linaje materno hasta Africa o Europa. (Los marcadores empleados son fragmentos de ADN que se forman cuando una enzima de restricción escinde el ADN mitocondrial; un fragmento generado a partir de ADN africano viene a ser dos fragmentos más pequeños en el ADN europeo.)

Los primeros informes indicaban la virtual inexistencia de ADN mitocondrial europeo en las abejas; o lo que era lo mismo, casi ninguna de las abejas muestreadas descendía de reinas europeas. De haberse producido el fenómeno de la hibridación, se habría detectado una mayor representación de ADN mitocondrial europeo.

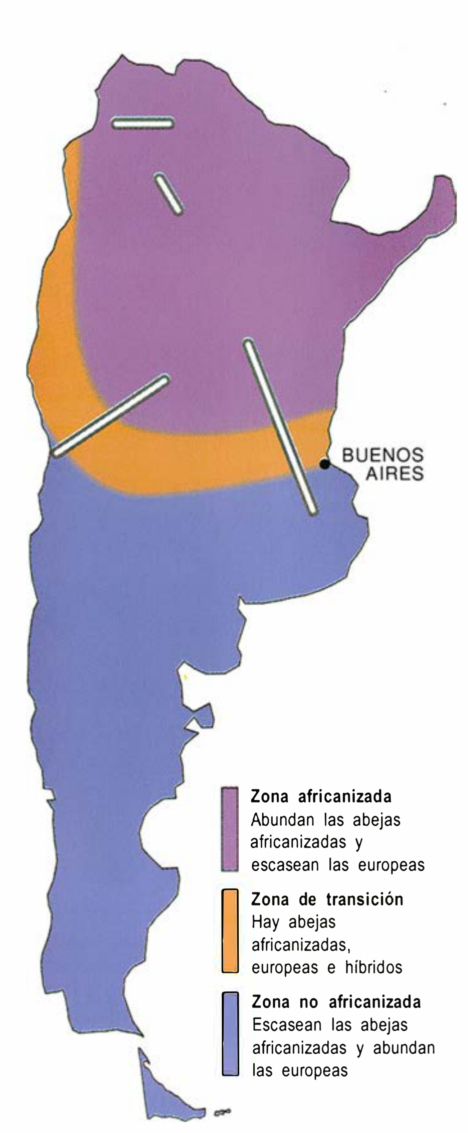
Los resultados parecían congruentes con la posibilidad de que hubiera algo que bloqueara la hibridación. Pero cabía también que las abejas estudiadas procedieran de lugares de escasa presencia de abejas europeas ferales; en cuyo caso, la falta de hibridación obedecería a la ausencia de abejas europeas disponibles para cruzarse con las africanas introducidas.

Para determinar la realidad o no de la hibridación había que investigar colonias en zonas donde existieran abejas europeas en el momento de arribada de las invasoras. Con ese fin viajamos a Argentina, que se halla al oeste de la estrecha parte meridional del Brasil y se extiende hacia el sur, en una zona templada. Las abejas africanizadas no se han establecido en la mitad austral del país, donde la apicultura es una actividad importante y se basa en estirpes europeas; sí han constituido, por contra, grandes poblaciones en la mitad septentrional, en particular en el tercio más norteño del país, que nunca ha mantenido tantas abejas europeas.

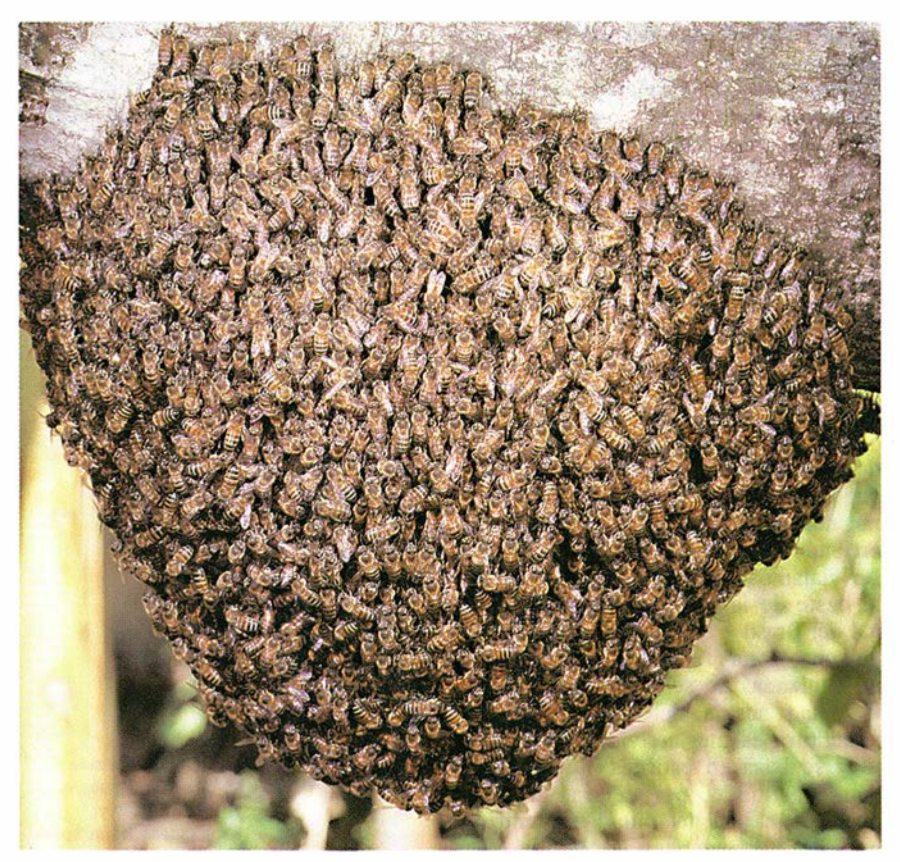
Julio A. Mazzoli, doctorando de la Universidad de Buenos Aires, nos ayudó a encontrar más de 100 colonias en puentes, árboles, postes eléctricos, cajas de frutas y otros lugares cerrados preferidos por las abejas melíferas. La colección incluía muestras del norte al sur. De vuelta a nuestros laboratorios, estudiamos la morfología y la composición de ADN mitocondrial. Los datos ponían de manifiesto la existencia de hibridación. Como parte de la prueba, hallamos que muchas colonias muestreadas ofrecían rasgos físicos intermedios entre los característicos de abejas europeas y los propios de africanas. Por si fuera poco, más de la cuarta parte de las colonias presentaba morfología africana (que reflejaba la actividad de genes nucleares derivados de antepasados africanos) y ADN mitocondrial europeo (que reflejaba la influencia de un antepasado femenino europeo), o bien exhibía morfología europea y ADN mitocondrial africano.

El rastreo morfológico reveló otro dato de interés: los rasgos físicos europeos emergían con mayor fuerza en las regiones australes, templadas, de los territorios estudiados que en el extremo septentrional, donde predominaba la morfología africana. Había, sin embargo, una banda de territorio bastante templado entre estas regiones donde no predominaba ningún grupo de rasgos morfológicos, lo que dejaba claro que allí se había asentado la hibridación, tesis confirmada por el análisis bioquímico de las isozimas.

No abundaban los híbridos fuera de la zona de transición por la razón presumible de que las condiciones en el norte tropical favorecen la supervivencia de abejas con rasgos africanos, mientras que las condiciones en el sur templado favorecen la supervivencia de abejas con rasgos europeos.



6. DIVISION TRIPARTITA de la Republica Argentina en razón de la cantidad de abejas africanizadas. En gran parte del norte (*púrpura*) las abejas están presentes durante todo el año. En la mayor parte del sur (*azul*) se encuentran ausentes. Análisis recientes de la morfología y del ADN mitocondrial en abejas de trechos que cruzan las tres zonas (*barras blancas*) indican que abejas africanizadas, abejas europeas y toda una gama de híbridos coexisten en la zona de transición intermedia. Este hallazgo respalda la hipótesis según la cual el apareamiento entre abejas africanizadas y europeas engendra descendientes viables.



7. ENJAMBRE DE ABEJAS AFRICANIZADAS que cuelga de una rama de árbol, hogar provisional de los insectos hasta que puedan construir una colmena en algún lugar protegido. Estas abejas desahíjan o enjambran (abandonan su colmena original para establecer una nueva) como parte del proceso mediante el cual las colonias de abejas se reproducen. El enjambramiento frecuente de las abejas africanizadas ha contribuido a su rápida dispersión por gran parte de América.

Estas presiones selectivas pueden crear un patrón similar en los Estados Unidos, cuyas regiones meridionales poseen un clima subtropical y, templado, las septentrionales. Las poblaciones europeas podrían decaer en el sur, en tanto que las africanas podrían ser menos competitivas en el norte. En las regiones centrales intermedias podría registrarse una mezcla de híbridos cuyo carácter pacífico y tolerancia al frío aumentaran con la latitud. Cabe, asimismo, una abundancia de híbridos en algunas áreas centrales durante las estaciones cálidas, para desaparecer en invierno.

Ante la escasez de abejas europeas en las regiones tropicales de Argentina, no podíamos saber si la presencia de una población europea de cierta entidad propiciaba su apareamiento con las abejas de tipo africano con la generación consiguiente de híbridos viables en los trópicos; teníamos conocimiento de que ésa era la situación habitual en las regiones templadas. Pero si los trópicos se resistían a la hibridación, carecería entonces de sentido inundar, de abejas europeas, las áreas comerciales de reproducción de Florida, Texas y otras regiones subtropicales.

Buscamos una respuesta en el Yucatán. La península mexicana goza de una combinación ideal de ambiente tropical y población de abejas melíferas europeas, numerosa y establecida desde hace largo tiempo. La verdad es que el Yucatán tiene la mayor concentración de colonias comerciales de abejas melíferas del mundo. Esta fue la primera población masiva de abejas europeas que encontraron las africanizadas en su expansión hacia el norte procedentes del Brasil.

Recogimos muestras en una franja muy amplia, contando con la colaboración de los apicultores locales. Pese a vivir en criaderos, las abejas melíferas del Yucatán guardan un presumible parecido genético con las abejas ferales. Los criaderos son cajas instaladas por los apicultores y dejadas al albur de los colonizadores. Los propietarios suelen dedicar muy poco esfuerzo a controlar la constitución genética de la colmena, salvo el sacrificio de las reinas más viejas (menos productivas) y el permitir que los miembros de la colmena críen una sustituta. Pero a veces se encuentra algún apicultor que practica la sustitución de reinas con reinas europeas precopuladas.

Casi todas nuestras muestras procedían de colonias que no habían experimentado sustitución de la reina en los dos años transcurridos desde la detección de las primeras abejas africanizadas en la península. Muchos insectos poseían todavía una morfología europea, pero algunos presentaban una morfología de aire africano y muchos manifestaban una morfología intermedia, que denunciaba la hibridación. Los análisis mitocondriales aportaron nuevas pruebas del cruzamiento: estas colonias exhibían una morfología europea y ADN mitocondrial africano y aquellas otras, lo contrario. De lo que se infiere que el entorno tropical no levanta una barrera infranqueable contra el proceso de hibridación.

Donde menos rasgos africanos se percibían era entre las colonias que habían sustituido la reina. Por consiguiente, los apicultores pueden tener en ese recurso un medio importante para controlar la africanización de sus poblaciones.

En confirmación reciente de nuestra tesis según la cual pueden darse niveles significativos de hibridación en los trópicos, han venido Robin F. Moritz y Michael S. Meusel. En el marco de un trabajo de un rastreo de abejas melíferas africanizadas ferales en Brasil, observaron que el 17 por ciento de las colonias presentaba ADN mitocondrial europeo. Crearon modelos matemáticos sobre los efectos que el enjambramiento reproductor intensivo de las abejas africanizadas ejercía en la composición de las poblaciones de abejas en zonas antaño exclusivas de abejas melíferas europeas. Llegaron al resultado siguiente: el crecimiento rápido de las abejas africanizadas, combinado con la ventaja de supervivencia de que gozan en medios tropicales, podrían permitirles predominar sobre las híbridas o sobre otras abejas con rasgos europeos. De lo que cabe deducir que, si queremos fomentar la hibridación en las regiones subtropicales, deberemos atender a una sustitución continua de las reinas por abejas europeas.

Con todo, la capacidad de las abejas melíferas africanizadas para hibridarse con las europeas constituye una buena noticia para la apicultura. Es de prever que la sustitución rutinaria de reinas en las colonias comerciales y la inundación de zánganos en áreas de reproducción servirán para amortiguar la adquisición de rasgos

africanos indeseables. Pero no existe acuerdo general, y hay quien objeta que, por mucho empeño que se ponga en la hibridación, no se impedirá la instalación final de rasgos africanos abominables en las poblaciones de abejas melíferas; arguméntase que las abejas africanizadas acabarán por dominar inevitablemente en las propias regiones de hibridación original. Pero nuestra experiencia desecha ese temor: nos encontramos con enjambres de abejas híbridas en la zona transicional de Argentina, unos 20 años después de la arribada allí de las abejas africanizadas.

Si no andamos errados, y puede acotarse la africanización de los apiarios estadounidenses, bastará con poner cierto cuidado en el transporte de abejas polinizadoras para que no se produzca ningún establecimiento significativo de colonias de abejas africanizadas en nuevos territorios. Para nuestra fortuna, disponemos de medios que nos permiten discernir el carácter de cada colonia y garantizar, en consecuencia, que las colonias transportadas de un lugar a otro sean europeas.

Es inevitable que la incursión de abejas africanizadas en los Estados Unidos encarezca la gestión de las colonias comerciales, al menos en un comienzo; resulta asimismo probable la propagación de algunos genes africanos por colonias ferales y domésticas. Pero en la vigilancia y la coordinación por parte de los apicultores reside la posibilidad de conservar el comportamiento europeo de las poblaciones comerciales de abejas melíferas, reduciendo así los efectos perjudiciales de los insectos africanizados.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE PAST AND POSSIBLE FUTURE SPREAD OF AFRICANIZED HONEYBEES IN THE AMERICAS. Orley R. Taylor, Jr. en *Bee World*, volumen 58, n.º 1, páginas 19-30; 1977.

THE "AFRICAN" HONEY BEE. Dirigido por Marla Spivak, David J. C. Fletcher y Michael D. Breed. Westview Press, 1991.

GENE FLOW BETWEEN AFRICAN- AND EUROPEAN-DERIVED HONEY BEE POPULATIONS IN ARGENTINA. Walter S. Sheppard, Thomas E. Rinderer, Julio A. Mazzoli, J. Anthony Stelzer y Hachiro Shimanuki en *Nature*, volumen 349, número 6312, páginas 782-784; 28 de febrero, 1991.

HYBRIDIZATION BETWEEN EUROPEAN AND AFRICANIZED HONEY BEES IN THE NEOTROPICAL YUCATAN PENINSULA. Thomas E. Rinderer, J. Anthony Stelzer, Benjamin P. Oldroyd, Steven M. Buco y William L. Rubink en *Science*, vol. 253, páginas 309-311; 19 de julio, 1991.

Fármacos de diseño

El diseño basado en la estructura molecular ha generado muchos y prometedores agentes terapéuticos; varios se están ensayando en humanos para el tratamiento del sida, el cáncer y otras enfermedades

Charles E. Bugg, William M. Carson y John A. Montgomery

La mayoría de los fármacos que se dispensan fueron descubiertos por observación casual o por un examen sistemático de numerosas sustancias naturales y sintéticas. En muchos casos, la mejora por el método de ensayo y error, o tanteo, de las sustancias halladas llevaba a una mayor potencia o a una menor toxicidad. El azar y la inquisición sistemática comienzan a dejar paso a una vía más directa, posibilitada en parte por un dominio más profundo de las interacciones moleculares que subyacen a las enfermedades.

Cada vez son más los investigadores, nosotros entre ellos, que obtienen resultados fructíferos del "diseño estructural de fármacos". Nuestro punto de partida no es el fármaco, sino su diana molecular, o efector, en el organismo. Caracterizamos la estructura tridimensional de una sustancia cuya participación en alguna patología es conocida. Construimos entonces un compuesto químico que se ajuste precisamente a esta sustancia y altere su actividad. Por ejemplo, podríamos diseñar un compuesto que bloqueara el lugar catalítico de una enzima esencial para la replicación vírica; de ese modo impediríamos la reproducción del virus y con ello frenaríamos la diseminación de la infección.

Utilizando un símil algo simplista, podrían equipararse las tácticas habituales para el descubrimiento de fármacos a la fabricación y prueba de muchas llaves hasta encontrar la que encajara casualmente en una cerradura de molde desconocido. Por contra, un estudio previo de la forma y disposición del seguro de la cerradura llevaría al diseño rápido de una llave eficaz.

Pese a su relativa ineficacia, los métodos tradicionales han proporcionado tratamientos para todo, desde leves dolencias hasta enfermedades que constituyen una verdadera amenaza contra la vida. También se benefician ahora de la automatización, que ha acelerado notablemente los procesos de rastreo a gran escala. Sin embargo, la metodología de base estructural puede producir fármacos prometedores con mayor celeridad y menor coste. Al estar configurados a la medida de sus efectores, los productos finales se muestran más potentes, más específicos y menos tóxicos que los remedios descubiertos por otros métodos.

Nuestra experiencia en la creación de un grupo de fármacos potenciales —uno de los cuales está en fase de ensayo para la curación de la psoriasis y cierta forma de "linfoma de células *T*"— ilustra el proceso y la eficacia del diseño. El nuestro no es en modo alguno el único producto de la tecnología de base estructural que ha alcanzado una etapa avanzada de desarrollo. Otro fármaco, el "captopril", se receta ya para el tratamiento de la hipertensión. Varios otros, producidos por distintos laboratorios, se están evaluando en humanos para el tratamiento de enfermedades muy diversas; entre ellas: cáncer, sida, glaucoma y resfriado común. Varios compuestos más se encuentran en fases de investigación menos avanzadas. Aunque no todos los fármacos que llegan a las últimas etapas de prueba resultan útiles para la terapia, los productos sometidos ya a ensayo clínico o en su antesala son bastante impresionantes.

Aunque la base teórica sobre la que descansa esa actividad se forjó hace cincuenta años, su aplicación práctica estaba fuera del alcance de la tecnología de entonces. Paul Ehrlich, bacteriólogo alemán, había demostrado tiempo atrás que los fármacos suelen inducir efectos fisiológicos fijándose a estructuras específicas (receptores) que participan en actividades celulares normales. Se observó también que la forma del fármaco y su composición química tenían que acoplarse al sitio de unión del receptor, normalmente una proteína. Con todo, se avanzó muy lentamente en el descubrimiento de fármacos, por vías empíricas además, hasta los años setenta.

Fue por entonces cuando se pusieron a punto nuevos métodos para la obtención de muestras puras de receptores proteínicos. Se progresó, a su vez, en cristalografía de rayos X, la única técnica disponible de formación de imágenes capaz de revelar la estructura de una proteína. En esta técnica se bombardean los cristales con rayos X. El cristal difracta los rayos y origina una depresión (el patrón de difracción) que impresiona una película fotográfica o detectores electrónicos más modernos. La distribución de los átomos en el seno del cristal condiciona los patrones de difracción resultantes. Con la ayuda de programas informáticos refinados, las configuraciones pueden traducirse en mapas que nos indican la estructura tridimensional de las proteínas dentro del cristal.

Miguel A. Ondetti y David W. Cushman y su grupo del Instituto Squibb

CHARLES E. BUGG, WILLIAM M. CARSON y JOHN A. MONTGOMERY colaboran en el diseño de fármacos en Birmingham. Bugg da clases de bioquímica en la Universidad de Alabama en Birmingham, cuyo centro de cristalografía macromolecular dirige. Carson está al frente del servicio de informática de dicho centro. Montgomery es vicepresidente y director de investigación en BioCryst, una compañía dedicada al diseño estructural de fármacos.

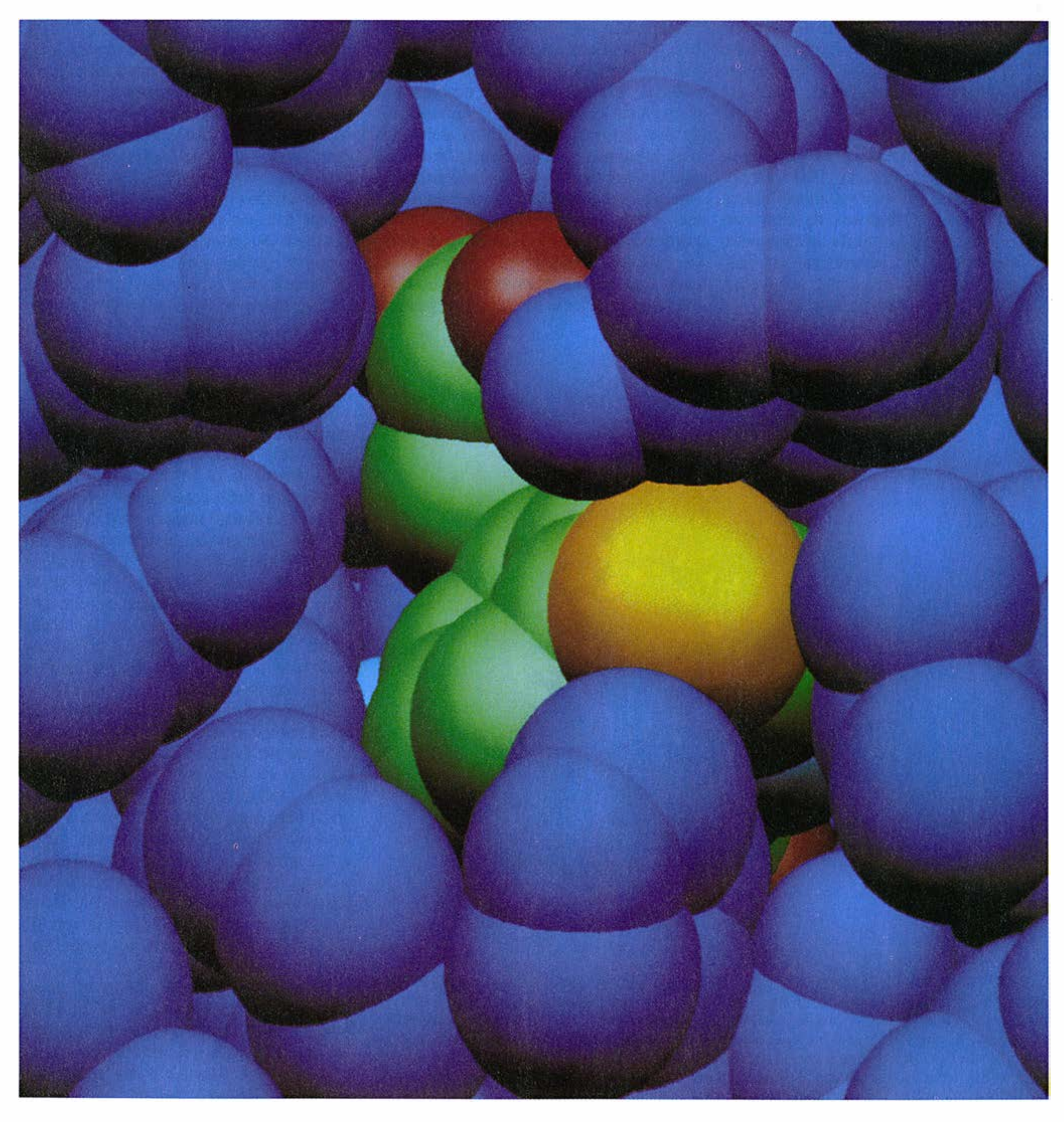
1. FARMACO A MEDIDA: la estructura multicolor del centro. Se trata de un inhibidor muy potente de la fosforilasa de los nucleósidos de purina (FNP) representada por las esferas azules. El inhibidor, desarrollado utilizando el método de diseño de fármacos atendiendo a su estructura, fue creado con el propósito específico de que encajara perfectamente en el lugar activo de la enzima. Se encuentra ahora en fase de experimentación animal para el tratamiento de la artritis; otro compuesto emparentado está en la fase de ensayo clínico para remediar la psoriasis y cierta forma de cáncer.

de Investigaciones Médicas (el actual Bristol-Myers Squibb) supieron sacarle partido a la cristalografía en el desarrollo de fármacos. Aunque ignoraban la arquitectura exacta de su objetivo, la enzima humana de conversión de la angiotensina (que interviene en el proceso de hipertensión), sí conocían la conformación de una enzima estrechamente emparentada. Aprovechando esa información consiguieron el "captopril" en 1975.

Montgomery y Bugg, dos de los autores, iniciaron su colaboración en el diseño de fármacos a finales de los años setenta. Un decenio después, nuestro programa se aplicaba en BioCryst Pharmaceuticals, empresa en cuya creación participamos. BioCryst se dedica al diseño estructural de fármacos.

Las enzimas eran entonces, y siguen siendo ahora, los objetivos favoritos, pues controlan importantes procesos bioquímicos de las enfermedades; podemos, sin embargo, degradar su función con relativa facilidad, encajando moléculas en los lugares activos (catalíticos). Pero también se están abordando fármacos dirigidos a otros tipos de objetivos que, como los ácidos nucleicos (ADN y ARN) y los receptores proteicos de ciertas hormonas, plantean mayores retos en el diseño. Así, los compuestos creados para regular la actividad de muchos receptores hormonales tendrían que ser más complejos que los inhibidores enzimáticos y formar más enlaces con los receptores.

Nos interesaba, de manera particular, diseñar una molécula que inhibiera la enzima fosforilasa de los nucleósidos de purina (FNP). La FNP interviene en la "vía de recuperación de las purinas" de las células. Capta nucleósidos, estructuras compuestas por una sustancia nitrogenada conocida como base púrica (la guanina, por ejemplo) y un azúcar. Con la ayuda de un ion fosfato, la enzima FNP separa del azúcar la purina, dando lugar a una base



púrica libre y un azúcar fosforilado. Una vez liberada la purina, la célula puede destruirla o reciclarla para la síntesis de nucleótidos de ADN.

A modo de contrapartida, la FNP puede también fragmentar ciertos agentes anticancerosos y antivíricos, que son análogos sintéticos de los nucleósidos de purina naturales, obstaculizando por tanto el tratamiento. Una de estas sustancias es el ddI (2',3'-dideoxi-inosina), que fue aprobado en 1991 por la norteamericana Administración de Alimentos y Fármacos para el tratamiento del sida. Nos proponíamos construir una entidad que, cuando se administrara con los análogos del nucleósido, desactivara la FNP durante el tiempo preciso para que los agentes anticancerosos y antivíricos pudiesen cumplir su misión terapéutica. Para que sirviese de fármaco, nuestro compuesto debería poder atravesar las membranas y penetrar en el interior celular, donde actúa la FNP. Otros investigadores habían ya identificado unos cuantos inhibidores de esta enzima, pero ninguno tenía la potencia suficiente que le permitiera ser útil en terapéutica y a la vez atravesar indemne la membrana celular.

Con el proyecto apenas empezado, recibimos redoblados estímulos para diseñar potentes inhibidores de la FNP. Los datos acumulados indicaban que el organismo necesitaba la enzima para el funcionamiento adecuado de las células *T*, pero no para el de los otros componentes del sistema inmunitario. Igual que otros equipos de investigación, comprobamos que los inhibidores de la FNP parecían suprimir selectivamente la excesiva actividad de las células *T* asociada a una serie de patologías autoinmunes, como la artritis reumatoide, la psoriasis, el lupus eritematoso sistémico, la esclerosis múltiple y la diabetes juvenil dependiente de insulina.

Centrado en la FNP nuestro objetivo proteínico, seguimos una estrategia sistemática para diseñar los compuestos inhibidores. Comenzamos por determinar la ordenación tridimensional de los átomos constitutivos del objetivo, prestando particular atención al sitio activo. Recurrimos a los ordenadores. Mientras observábamos un candidato en el monitor, lo colocábamos en el lugar activo, examinando de qué modo la forma y estructura química del candidato se complementarían con las del centro activo. Utilizamos programas que nos ayudaron a calcular la intensidad de las fuerzas intermoleculares atractivas y repulsivas entre el candidato y el sitio activo.

Es necesario un ajuste muy fino para conseguir potencia y especificidad. Un fármaco que permanece ligado a su receptor y lo inactiva durante mucho tiempo puede administrarse en menores dosis que otro que se separe rápidamente. Resulta, además, improbable que una sustancia diseñada para encajar perfectamente en un lugar particular de enlace de una proteína interaccione bien con otra molécula; por tanto, la sustancia tenía que limitar al máximo las interacciones indeseables y, con ellas, los efectos secundarios.

Sólo sintetizamos las sustancias químicas que, de acuerdo con nuestras simulaciones informáticas, mostraban mayor afinidad por el receptor. Luego valoramos el efecto de los fármacos sobre la actividad de la molécula receptora y cotejamos el ajuste teórico con el real. Dado el carácter todavía imperfecto de los programas de modelación molecular, algunos de los compuestos que sintetizamos no estuvieron a la altura de nuestras expectativas. Después de analizar los éxitos y los fracasos, volvimos al ordenador para introducir modificaciones que incrementasen la eficacia del fármaco candidato.

Esta estrategia de iteración —de modelación repetida, síntesis y análisis estructural— nos llevó a un puñado de compuestos muy potentes que dieron resultados satisfactorios al ser ensayados en células enteras y en animales. Si algún compuesto se hubiera tropezado con alguna dificultad en las pruebas celulares o en animales (problemas para atravesar la membrana celular, por ejemplo) hubiéramos vuelto al ordenador para corregir el fallo y habríamos reciclado a través del circuito el fármaco modificado.

El protocolo entero, desde la elección de la molécula receptora hasta la creación de un fármaco adecuado para su empleo en ensayos clínicos, puede ahora realizarse quizás en dos o tres años. Pero hace veinte, la primera y más decisiva etapa, la determinación de la estructura de la molécula efectora, resultaba muy laboriosa. Ocupó nuestra atención y la de un equipo de cristalógrafos encabezados por Steven E. Ealick durante la mayor parte del decenio de los ochenta.

En nuestro caso, el escollo no tenía que ver con la obtención de la FNP pura, ni con la conversión de las proteínas en cristales. Robert E. Parks, Jr. y Johanna D. Stoeckler, de la Universidad de Brown, habían aislado la

2. ESTRUCTURA GENERAL DE LA FNP, resaltada en esta imagen generada por ordenador y coloreada según el tipo de átomo. La enzima está constituida por tres lóbulos, o subunidades, idénticos distribuidos alrededor de un eje central. Las subunidades se distinguen por las cintas de colores que representan la espina dorsal proteica de dichas subunidades. Los tres sitios activos se muestran ocupados por un nucleósido de purina y un ion fosfato (*estructuras representadas por grandes esferas*), las sustancias sobre las que suele actuar la FNP.

enzima de células humanas y se la suministraron a William J. Cook, de la Universidad de Alabama en Birmingham, quien consiguió cristales bien ordenados y necesarios para los estudios de difracción de rayos X.

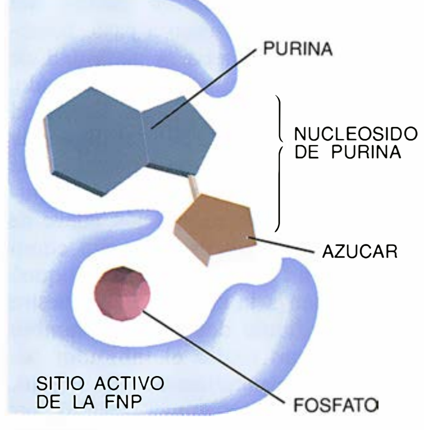
Demostramos con cierta facilidad que la FNP cristalina era esencialmente idéntica a la presente en el organismo. De haber diferido sustancialmente, hubiera carecido de sentido el fundar el diseño de fármacos en la estructura cristalina. Además, Jon M. Crate, del laboratorio de Bugg, estableció que el cristal de la proteína funcionaba: catalizó la misma reacción que la FNP induce en los sistemas vivos.

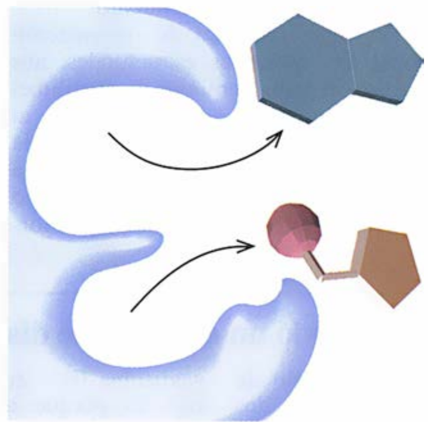
La dificultad surgió cuando procedimos a determinar la estructura en sus pormenores. En los primeros años dependíamos de una fuente de rayos X que generaba ondas de intensidad relativamente baja. Los patrones de difracción resultantes, de baja resolución, nos permitían discernir la morfología general de las moléculas, pero no podíamos situar adecuadamente cada átomo. Por fin completamos los detalles que faltaban en colaboración con John R. Helliwell, del laboratorio Daresbury de radiación de sincrotrón; éste emitía los intensos rayos X necesarios para obtener imágenes de alta resolución. En la actualidad existen equipos avanzados y más instalaciones de sincrotrón para la cristalografía de proteínas.

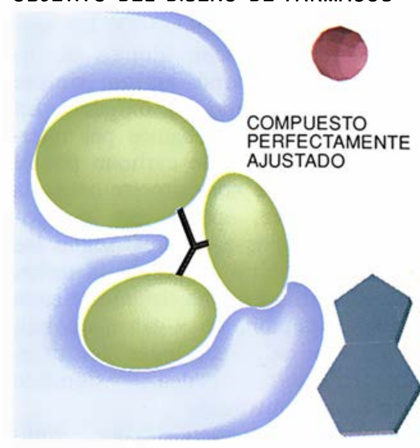
Los datos derivados de los rayos X permitieron establecer el elevado grado de porosidad de los cristales de la FNP, propiedad que nos resultó muy útil a la hora de conocer la capacidad de los fármacos propuestos para inhibir la actividad de la FNP. También nos enseñaron que la enzima FNP funcional es un trímero: una unidad de tres monómeros. Y demostramos además que el trímero presentaba tres sitios activos idénticos, uno en cada punto de unión entre monómeros. (En el resto de este artículo hablaremos como si sólo hubiera un lugar activo, formado por dos monómeros contiguos.)

Del análisis de los complejos formados tras la fijación de nucleósidos sintéticos, incluidos los inhibidores descubiertos antes, al sitio activo, sacamos una información más valiosa si cabe: la forma de dicho lugar activo, que viene a ser una hendidura irregular en la superficie de la enzima. Determinamos, asimismo, la identidad exacta de los aminoácidos que lo constituyen, un dato imprescindible para acometer el diseño de fármacos.

Las determinaciones estructurales también produjeron sorpresas. La forma de la enzima cambia manifiestamente cuando la región activa se liga a otra molécula. En otras palabras, el símil de la llave y la cerradura resultaba una falacia: la forma de la cerradura no es estática, sino flexible. Por ejemplo, un tramo de aminoácidos de cada monómero de la FNP crea un bucle que funciona a modo de puerta giratoria: de ordinario cubre el lugar activo más cercano, pero puede moverse para dejar espacio a un nucleósido o molécula análoga. El conocimiento de estos cambios conformacionales nos facilitó la modelación, ya que nos permitía predecir qué partes de la estructura de la enzima FNP cambiaban su configuración para interaccionar con un inhibidor propuesto.







3. EL SITIO ACTIVO DE LA FNP enlaza (*arriba a la izquierda*) un ion fosfato (*rosa*) y un nucleósido de purina, que consta de una base nitrogenada (*azul oscuro*) unida a un azúcar (*marrón*), facilitando así la ruptura del nucleósido (*abajo a la izquierda*). Para retrasar la escisión, diseñamos un compuesto (*arriba, verde*) que ajustara a la perfección y se fijara intensamente en el sitio activo, impidiendo que la FNP captara otras sustancias y actuara sobre ellas.

Definido y acotado el objetivo, nos centramos en la creación de inhibidores de la FNP. A finales de los ochenta, se formó un grupo de diseño integrado por los autores y Ealick, además de Mark E. Erion y Wayne C. Guida, de Ciba-Geigy, Y. Sudhakar Babu, de ByoCrist, y John A. Secrist III, del Instituto Meridional de Investigación de Birmingham. Eramos muy pocos, en comparación con los ejércitos de químicos y farmacólogos que han necesitado los métodos tradicionales de selección y síntesis de fármacos potenciales.

Comenzamos por abordar la región de unión a la purina del sitio activo. Habríamos de atender luego a la región de unión al azúcar y, por último, a la zona de engarce del fosfato. Cada paso sucesivo, que nos acercaría a la ocupación completa de la región activa, potenciaría la afinidad del fármaco candidato por la enzima. En eso confiábamos.

De nuestros exámenes cristalográficos sabíamos que tres aminoácidos de la cavidad de unión a la purina de la FNP forman puentes de hidrógeno con las purinas y sus análogos. Tales uniones se cuentan entre los enlaces químicos reversibles más fuertes que existen: consisten en dos átomos, normalmente dos nitrógenos o un nitrógeno y un oxígeno, que comparten un átomo de hidrógeno. Al proponer candidatos para nuestro inhibidor nos ceñimos, pues, a los compuestos que por lo menos formaran puentes de hidrógeno con los tres aminoácidos, constituyentes todos del mismo monómero.

Pensamos que podríamos conseguir enlaces fuertes sustituyendo un átomo de carbono por un átomo de nitrógeno específico de la guanina. Esta purina consta de una combinación de cinco átomos de carbono y cuatro de nitrógeno, dispuestos en dos anillos contiguos. (Se asigna un número del uno

al nueve a cada carbono y a cada nitrógeno de los anillos.) De los anillos sobresalen varios átomos de hidrógeno, un grupo amino simple (NH_2) y un átomo de oxígeno. En particular, nos inclinábamos por intercambiar un átomo de carbono por el de nitrógeno que normalmente ocupa la posición nueve, opción que se apoyaba en estudios anteriores, según los cuales tal cambio favorecía la unión a la FNP. La guanina así modificada recibe el nombre de 9-deazaguanina; el número indica el lugar del cambio, y el término "deaza" significa "privada de nitrógeno".

Esperábamos, además, que, enlazando un grupo amino al átomo de carbono en posición ocho de nuestra molécula de guanina alterada, aumentaría la afinidad de la purina hacia la FNP. Después de todo, el más potente inhibidor de la FNP permeable a la membrana del que se disponía en los ochenta incorporaba un grupo amino en esa misma posición.

Siguiendo un esquema gradual, modificamos la porción purina del inhibidor potencial, paso a paso. Sometimos luego a prueba la actividad de las moléculas resultantes examinando, en el tubo de ensayo, su habilidad para evitar que la FNP catalizase la fragmentación de nucleósidos. De acuerdo con lo previsto, la sustitución del nitrógeno en posición nueve de la guanina por un carbono dio como resultado un inhibidor que bloqueó bastante bien a la enzima. Para nuestro pesar, la adición del segundo cambio al primero no rindió el inhibidor superior que esperábamos. En efecto, nuestra mejor esperanza resultó ser un agente un tanto deslucido.

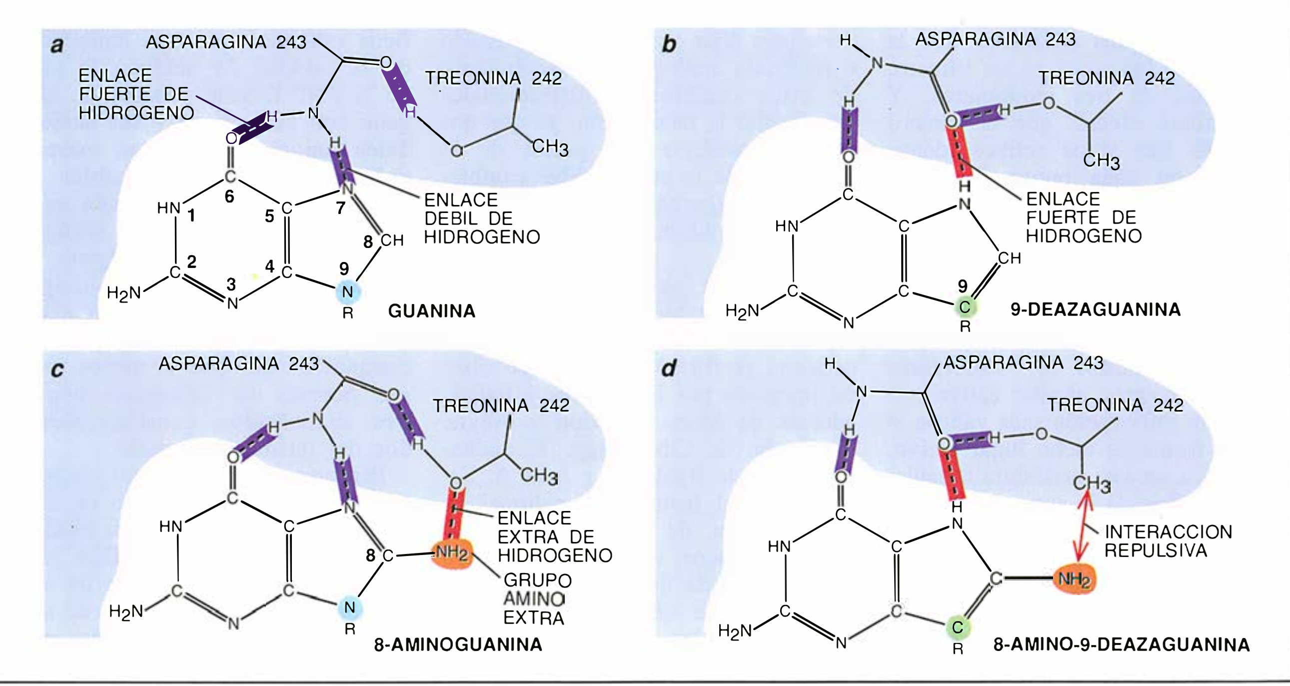
De haber carecido de información sobre sus caracteres estructurales, nos hubiera dejado perplejos la inutilidad de la adición de un grupo amino al carbono de la posición ocho. Pero la cristalografía nos ofreció una pronta explicación. Analizamos por separado las estructuras de los complejos formados por la FNP y cuatro compuestos distintos. La porción purínica de los compuestos era de cuatro tipos: guanina pura, guanina de la forma sustituida con carbono (9-deazaguanina), guanina con un grupo amino extra en posición ocho (8-aminoguanina) y guanina doblemente modificada (8-amino-9-deazaguanina).

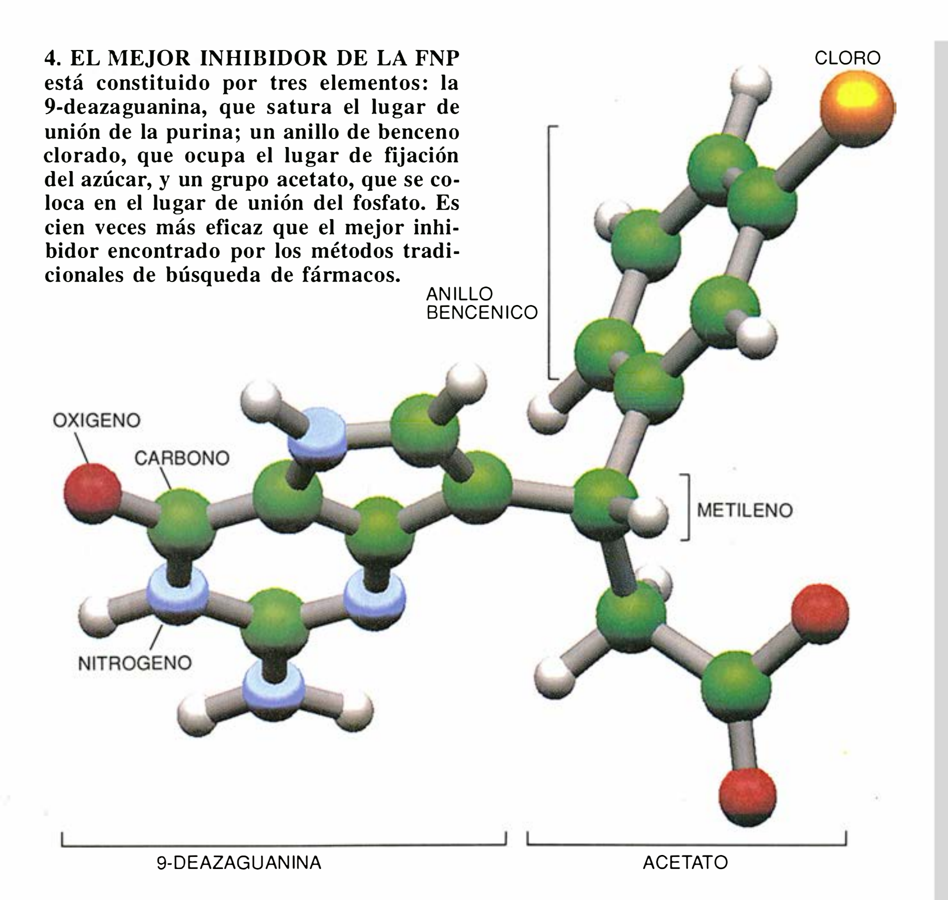
Vimos que uno de los tres aminoácidos que forman el sitio de unión a la guanina en la FNP, una asparagina en la posición 243 de la cadena proteínica, interactúa con la guanina para establecer un puente de hidrógeno fuerte y otro débil. A la vez, la asparagina forma un puente de hidrógeno con un aminoácido vecino, la treonina 242. Este enlace estabiliza la unión de la asparagina a la guanina.

El cambio del nitrógeno por carbono en la variante 9-deaza favorece directamente la asociación con la FNP; sustituye un enlace débil entre la asparagina 243 y la guanina por un puente de hidrógeno fuerte. La for-

Así se resolvió un misterio de diseño

Para crear una molécula que bloqueara el sitio de unión de la purina en la FNP, se provocaron dos cambios en la guanina. Se esperaba que los compuestos portadores del derivado de la guanina resultante se engarzaran fuertemente a la FNP. Pero falló la estrategia. Los análisis de los enlaces químicos existentes en los complejos formados por la unión de la FNP con este derivado de la guanina y otros relacionados aclararon la causa. La guanina (*a*) forma dos enlaces de hidrógeno (*bandas moradas*) con el aminoácido asparagina que reside en la posición 243 de la FNP. ("R" es el resto del compuesto.) Haciendo uno de los cambios propuestos en la guanina —sustitución del nitrógeno en posición nueve (*esfera azul*) por un carbono (*verde*), generando así 9-deazaguanina (*b*)— aumentó la afinidad hacia la FNP; ocurrió tal porque un enlace de hidrógeno fuerte (*rojo*) sustituyó al más débil. Mediante otro cambio independiente en la guanina (*c*) —colocación de un grupo amino (*naranja*) en lugar del hidrógeno unido al carbono en la posición ocho— mejoró algo la afinidad de la guanina por la enzima. Esto se consiguió al hacer que apareciera un enlace extra de hidrógeno (entre el grupo amino y la treonina 242). Al efectuar los dos cambios a la vez (*d*) se produjo un inhibidor deficiente porque la alteración dual llevó a un enfrentamiento repulsivo entre la treonina 242 y el grupo amino (*flecha roja*). Así pues, el ejercicio reveló que la 9-deazaguanina se uniría mucho mejor en la realidad.





4. EL MEJOR INHIBIDOR DE LA FNP está constituido por tres elementos: la 9-deazaguanina, que satura el lugar de unión de la purina; un anillo de benceno clorado, que ocupa el lugar de fijación del azúcar, y un grupo acetato, que se coloca en el lugar de unión del fosfato. Es cien veces más eficaz que el mejor inhibidor encontrado por los métodos tradicionales de búsqueda de fármacos.

mación de la variante 8-aminoguanina conduce a una unión fuerte por otro camino, mediante la instauración de un enlace de hidrógeno extra entre la purina y la FNP. En concreto, se forma un enlace de hidrógeno entre el grupo amino añadido y la treonina 242.

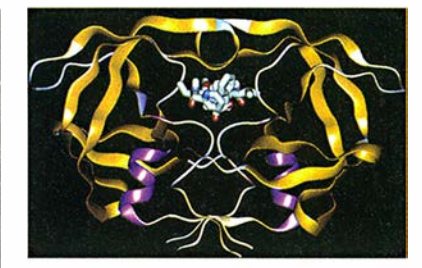
La combinación de las dos "mejoras", es decir, la sustitución del nitrógeno por el carbono y la adición del grupo amino a la posición ocho, había sido contraproducente por la sencilla razón de que el carbono en posición nueve impedía que el grupo amino de la posición ocho estableciese el enlace extra con la treonina 242. En efecto, produce una desfavorable interacción repulsiva entre la treonina y el grupo amino añadido.

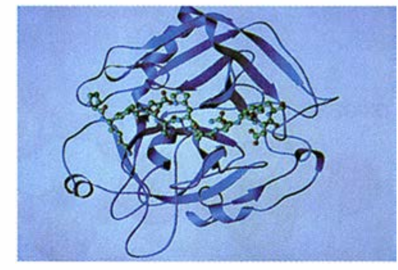
Ante esas observaciones, comprendimos de inmediato cuán infructuoso resultaba buscar inhibidores que incorporaran la 8-amino-9-deazaguanina; la propia 9-deazaguanina constituiría una elección mejor para el componente purina del inhibidor. Nos demuestra ese fracaso la maravillosa economía que supone el empleo del método fundado en la estructura. Como suele ocurrirles a los farmacólogos tradicionales, íbamos abocados a un callejón sin salida. Pero nuestro acceso a una información minuciosa sobre la estructura nos permitió reaccionar en seguida. Sin los datos cristalográficos, posiblemente hubiéramos tomado una vía de investigación lógica, aunque estéril, durante mucho más tiempo del que en realidad empleamos.

Debíamos acometer entonces una nueva tarea, la de saturar el sitio de unión del azúcar. La unión del azúcar de un nucleósido a la FNP no se realiza principalmente a través de puentes de hidrógeno; antes bien, intervienen atracciones hidrofóbicas más potentes. El efecto hidrofóbico le resulta familiar a cualquiera que se haya parado a ver cómo se separa el aceite del agua al aliñar una ensalada. Las moléculas oleosas tienen poca afinidad por el agua y, sin embargo, se atraen mutuamente. La cavidad enzimática de unión al azúcar consta de tres aminoácidos hidrofóbicos. Dos de ellos (una fenilalanina y una tirosina) proceden del mismo monómero que se engarza en la guanina. El tercero (una fenilalanina) lo aporta el monómero contiguo.

Varios inhibidores conocidos portaban un grupo benceno (un anillo formado por seis átomos de carbono y sus hidrógenos asociados) en vez del azúcar de los nucleósidos. (El azúcar se fija a la posición nueve de la purina.) Así pues, examinamos el efecto inhibidor de un conjunto constituido por un benceno ligado a la posición nueve (ahora un átomo de carbono) de la 9-deazaguanina. El compuesto se comportó mejor cuando unimos el grupo benceno a la 9-deazaguanina, no directamente, sino a tra-

OBJETIVO PROTEINICO	ENFERMEDADES	CREADORES
Proteasa del VIH	SIDA	Laboratorios Abbott
Proteasa del VIH	SIDA	Laboratorios Merck
Timidilato sintasa	Cáncer, psoriasis	Agouron
Trombina	Coágulos sanguíneos	Biogen
Anhidrasa carbónica	Hipertensión ocular/ glaucoma	Laboratorios Merck
Proteína de la cubierta del rinovirus	Resfriado común	Sterling Winthrop





5. MUESTRARIO DE FARMACOS PROMETEDORES creados por diseño estructural, en fase de ensayo clínico. Entre ellos hay un inhibidor de la enzima sintetizada por el virus agente del sida, el VIH (la versión de Abbott aparece en las esferas en la fotografía superior). Otro ejemplo es un inhibidor de la trombina, diseñado para frenar la coagulación sanguínea (*foto inferior*).

vés de un intermediario: el átomo de carbono de un grupo metileno (CH_2). No obstante, sospechábamos que podíamos perfeccionarnos.

En la pantalla del ordenador vimos que la cavidad de unión al azúcar podía ocuparse mejor añadiendo algún agrupamiento químico al anillo del benceno. De las adiciones ensayadas, unas no resultaron, y la cristalografía nos reveló el motivo, pero otras lo hicieron a plena satisfacción. Logramos el mejor ajuste añadiendo un átomo de cloro al átomo de carbono en posición tres del anillo bencénico.

Habíamos ejecutado dos tercios de nuestro plan. La etapa final consistía en añadir un grupo que interactuara con el lugar de unión al fosfato. No podíamos emplear directamente esta molécula, en parte porque los compuestos que la contienen no atraviesan fácilmente las membranas celulares. Los estudios de modelación iniciales nos animaron a preparar varias estructuras; no pudieron éstas mejorar la afinidad de unión de nuestra estructura bipartita. Sucedía que las modificaciones químicas que parecían tan razonables en la pantalla del ordenador originaban, en la realidad, sustancias que no podían orientarse adecuadamente en el sitio activo. Aunque desilusionados, agradecimos que, de nuevo, la cristalografía nos permitiera discernir las causas del fracaso y abandonar las estrategias sentenciadas a priori. De hecho, la información extraída de la cristalografía nos ayudó a realizar los cálculos gracias a los cuales conseguimos compuestos que se enlazarían bien con la FNP.

Así, los cálculos en cuestión nos movieron a agregar un grupo acetato (CH_2COO^-) al átomo de carbono metilénico, que enlazó la 9-deazaguanina al anillo de benceno clorado. Este paso orientó el segmento carboxílico (COO^-) del grupo acetato de modo que pudiera acoplarse al lugar de unión del fosfato. El grupo carboxilo es atraído hacia un aminoácido dotado de carga positiva del centro activo de la enzima.

Cuando sometimos a prueba la capacidad de la molécula entera para inhibir a la FNP, los resultados fueron gratificantes. El compuesto bloqueó la escisión de los nucleósidos con una eficacia que centuplicaba la de cualquier otro de los candidatos disponibles. La suerte nos acompañaba. Pero, ¿sería este compuesto útil en el organismo y, como él, otros tantos que habíamos sintetizado y que eran de diez a veinte veces más potentes que los inhibidores existentes? Para contestar a la pregunta, estudiamos qué capacidad tenían varias de nuestras moléculas para proteger el fármaco ddI, utilizado contra el sida, de la degradación por la FNP en ratas. Todas alargaron la vida media de este análogo de nucleósido. Pruebas recientes han demostrado que nuestros inhibidores de la FNP pueden proteger a otros análogos nucleosídicos y suprimir la función de las células *T* en cultivos celulares y en animales de experimentación.

Habíamos cumplido nuestro propósito de partida: desarrollar inhibidores de la FNP que prolongasen la supervivencia de los nucleósidos sintéticos en animales. Habíamos logrado ese sueño de diez años antes de que hubieran transcurrido tres desde que un pequeño grupo de químicos orgánicos empezaran a sintetizar los candidatos. En la práctica tradicional, la invención de inhibidores enzimáticos suele tardar más de diez años y puede costar decenas de millones de dólares. Y nos bastó con preparar unos sesenta compuestos para poder identificar inhibidores de gran potencia, una cifra irrelevante comparada con los centenares o miles de candidatos que se generarían siguiendo las vías tradicionales.

En la facultad de medicina de la Universidad de Washington acaban de terminar dos ensayos clínicos combinados de fase I y fase II de uno de nuestros mejores inhibidores: el BCX-34. Se trataba de pequeños ensayos centrados en la seguridad y la eficacia. Ante el buen comportamiento del fármaco contra la psoriasis y el linfoma cutáneo de células *T*, se está pensando en ampliar las pruebas de fase II (eficacia). Nuestro inhibidor más potente y sus parientes inmediatos han sido patentados por Ciba-Geigy para el posible tratamiento de la artritis y se están ensayando en animales.

La experiencia, nuestra y de otros investigadores, en el diseño estructural de fármacos ha sido muy satisfactoria. Pero deben superarse importantes escollos para que esta estrategia desarrolle todo su potencial. A un nivel fundamental, las interacciones moleculares que originan las enfermedades no siempre aparecen con nitidez, lo que impide que puedan acotarse bien los objetivos.

Hay otro obstáculo, relacionado con la naturaleza proteínica de la mayoría de los efectores farmacológicos. Aunque las técnicas de biología molecular han permitido disponer de proteínas en abundancia, algunas siguen siendo difíciles de obtener en forma pura. Y cuando el suministro no es un problema, sigue siéndolo, y

difícil, la resolución de su estructura. La cristalografía funciona maravillosamente si se tienen cristales bien ordenados, pero, consideradas en grupo, cuesta obtener la adecuada cristalización de las proteínas para los estudios de difracción de rayos X de alta resolución. (Y lo mismo puede predicarse de los ácidos nucleicos.) Las proteínas unidas a la membrana, varios receptores hormonales entre ellas, se muestran particularmente refractarias; son oleosas y se pegan entre sí de modos muy aleatorios.

Los cristalógrafos de proteínas que trabajan en laboratorios farmacéuticos han empezado a resolver el problema de la cristalización ayudándose de la robótica. Los sistemas robóticos analizan automáticamente miles de combinaciones de condiciones de cristalización y pueden sugerir soluciones óptimas. Al mismo tiempo, se están perfeccionando los equipos de obtención e interpretación de las imágenes de difracción de rayos X y se están desarrollando técnicas para determinar la estructura tridimensional de las macroproteínas no cristalizadas en su ambiente acuoso natural. Se ha aplicado la espectroscopía por resonancia magnética nuclear (RMN) para resolver las estructuras de algunas proteínas grandes, pero ninguna del tamaño de la enzima FNP. Esa limitación podría doblegarse en el futuro.

Habrá de llegar el día en que podamos prescindir de la cristalografía y la RMN, deduciéndose la estructura tridimensional de los efectores proteínicos directamente a partir de su secuencia lineal de aminoácidos. De momento, sin embargo, la capacidad de predicción de nuestros programas informáticos deja mucho que desear, tanto para resolver la estructura de una molécula receptora como para valorar el ajuste y la atracción entre ésta y el fármaco propuesto. Con todo, la predicción va afinándose a medida que se consolida el fundamento teórico de los programas. Andando el tiempo, los análisis informáticos proporcionarán directamente a los investigadores la mejor composición de un fármaco, liberándoles de la tarea de tener que sintetizar y probar compuestos intermedios menos eficaces. Lo ideal sería conseguir el mejor fármaco al primer intento, bien partiendo desde cero o alterando una sustancia ya existente.

Aunque esta meta queda todavía lejos, nuestro desarrollo de potentes inhibidores de la FNP y la invención paralela de distintos inhibidores enzimáticos por otros químicos estructurales demuestran que, perfecto o no, el diseño estructural de fármacos ya es bastante útil. Entre los candidatos en fase de ensayo clínico hay dos que se han creado por separado; uno en los laboratorios Abbott y el otro en los Merck. Estos fármacos inhiben una enzima sintetizada por el virus de la inmunodeficiencia humana que causa el sida (el VIH). Esta enzima, una proteasa, es necesaria para el ensamblaje preciso de las partículas víricas y para su diseminación celular. El abordaje estructural permitió que los fármacos llegasen a la fase de ensayos humanos antes de cuatro años.

Agouron ha creado unos bloqueantes enzimáticos que se están estudiando en cancerosos. Estos fármacos inhiben la timidilatosintasa, enzima que participa en la síntesis de los nucleótidos que las células tumorales necesitan para replicar su ADN y proliferar. Y se está examinado la capacidad de un inhibidor desarrollado por Merck para combatir el glaucoma; se opondría a la acción de la enzima anhidrasa carbónica. Merck está trabajando también en un fármaco, que no ha llegado todavía a la fase de ensayo clínico, para el tratamiento del enfisema. Se trata de un medicamento que bloquea la acción de la elastasa de los neutrófilos humanos, una enzima involucrada en la lesión del tejido pulmonar; esa elastasa podría participar también en la artritis reumatoide y el síndrome del dolor respiratorio agudo.

No hará más de una docena de años, los laboratorios Merck creaban un grupúsculo de investigación dedicado al diseño estructural de fármacos. Hoy, casi todas las grandes compañías farmacéuticas poseen esa sección. Todos los indicios señalan que el diseño estructural de fármacos se consolidará y contribuirá de forma sustancial a las medicinas del futuro.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

APPLICATION OF CRYSTALLOGRAPHIC AND MODELING METHODS IN THE DESIGN OF PURINE NUCLEOSIDE PHOSPHORYLASE INHIBITORS. S. E. Ealick, Y. S. Babu, C. E. Bugg, M. D. Erion, W. C. Guida, J. A. Montgomery y J. A. Secrist III en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 88, n.º 24, páginas 11540-11544; 15 de diciembre de 1991.

APPLICATION OF CRYSTALLOGRAPHY TO THE DESIGN OF ANTIVIRAL AGENTS. M. G. Rossmann y M. A. McKinlay en *Infectious Agents and Disease*, vol. 1, n.º 1, páginas 3-10; febrero de 1992.

USE OF STRUCTURAL INFORMATION IN DRUG DESIGN. M. A. Navia y M. A. Murcko en *Current Opinion in Structural Biology*, volumen 2, n.º 2, páginas 202-210; abril de 1992.

Osciladores acoplados y sincronización biológica

Un sutil hilo matemático conecta los relojes, la ambulación de los elefantes, los ritmos cerebrales y la instauración del caos

Steven H. Strogatz y Ian Stewart

En febrero de 1665, el gran físico holandés Christiaan Huygens, inventor del reloj de péndulo, hubo de recluirse en su cuarto a causa de una enfermedad. Un día, sin nada mejor que hacer, se quedó mirando distraídamente un par de relojes que había construido hacía poco y que estaban colgados uno junto al otro. Se percató de pronto de algo muy curioso: los dos péndulos oscilaban con perfecta sincronía.

Huygens estuvo observándolos durante horas, mas nunca perdieron el sincronismo. Probó entonces a perturbarlos; al cabo de media hora habían vuelto a coger el paso. Huygens sospechaba que los relojes habían de influir el uno sobre el otro, tal vez por medio de debilísimos movimientos del aire o de vibraciones imperceptibles en su soporte común. Como era de esperar, cuando los situó en lados opuestos de la habitación, los relojes fueron poco a poco perdiendo el paso, y uno de ellos se retrasó cinco segundos diarios respecto al otro.

Aquella observación fortuita de Huygens dio comienzo a una subrama enteramente nueva de las matemáticas, la teoría de los osciladores acoplados. Podemos hallar osciladores acoplados de uno a otro extremo del mundo natural, pero resultan especialmente conspicuos en los seres vivos: las células marcapasos del corazón, las células secretoras de insulina del páncreas, las redes neuronales del cerebro y de la médula espinal que controlan conductas rítmicas como la respiración, la carrera o la masticación. Y no es preciso que todos los osciladores estén englobados en un mismo organismo; fijémonos si no en el canto unísono de los grillos y en las congregaciones de luciérnagas que destellan con sincrónica intermitencia.

Los biomatemáticos vienen estudiando, desde los años sesenta, modelos de osciladores acoplados simplificados, que retienen, no obstante, la esencia de sus prototipos biológicos. Durante estos últimos años se han conseguido rápidos progresos gracias a los avances en ordenadores y en grafismo informático, a la colaboración con matemáticos experimentalistas receptivos ante la teoría, a ideas tomadas de la física y a nuevos desarrollos genuinamente matemáticos.

Para comprender el funcionamiento conjunto de los osciladores acoplados es necesario comprender primero el funcionamiento de un oscilador individual. Un oscilador es un sistema cualquiera que manifieste un comportamiento periódico. Por ejemplo, un péndulo, en su vaivén, retorna a intervalos regulares a un mismo punto del espacio; por otra parte, también su velocidad aumenta y disminuye con (cronométrica) regularidad.

En lugar de limitarse a considerar la conducta del oscilador en el curso del tiempo, a los matemáticos les interesa más su movimiento a través del espacio de fases: espacio abstracto cuyas coordenadas describen el estado del sistema. El movimiento de un péndulo en el espacio de fases, por ejemplo, se representa situando en un sistema coordenado las posiciones y velocidades que vaya adquiriendo tras soltarlo desde diversas alturas. En el espacio de fases tales trayectorias resultan ser curvas cerradas, porque el péndulo, lo mismo que cualquier otro oscilador, repite una y otra vez los mismos movimientos.

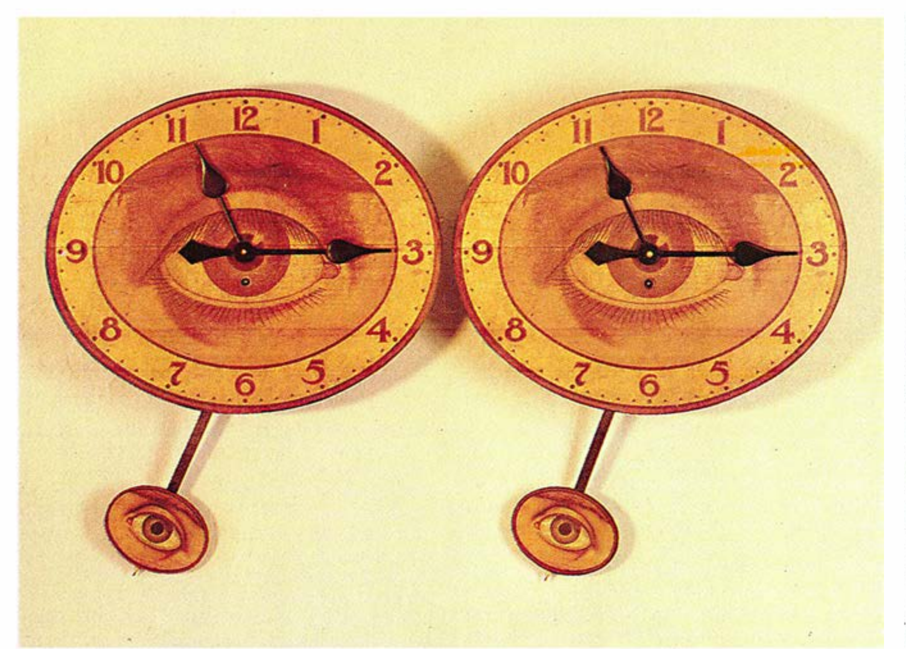
Un péndulo simple, como el formado por un peso atado al extremo de un hilo, puede seguir en el espacio de fases una cualquiera entre una infinidad de trayectorias cerradas, dependiendo de la altura desde la que se le suelte. Los sistemas biológicos (y los péndulos de los relojes) tienden, contrariamente, a tener no sólo un período característico, sino también una amplitud característica. Describen a través del espacio de fases una trayectoria bien determinada; si alguna perturbación los obliga a apartarse de su ritmo acostumbrado, no tardan en volver a tomar su senda habitual. Si alguien nos grita inesperadamente y nos asusta, tal vez el corazón nos lata con violencia durante unos segundos, pero pronto se apacigua y vuelve al ritmo normal.

Los osciladores que poseen una forma de onda y una amplitud que atienden a un patrón bien caracterizado, al cual retornan tras sufrir pequeñas perturbaciones, se denominan

STEVEN H. STROGATZ y IAN STEWART trabajan en campos fronterizos entre la matemática pura y la aplicada. Strogatz es profesor del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Se doctoró en la Universidad de Harvard con una tesis sobre modelos matemáticos de los ciclos humanos de vigilia y sueño. Stewart dirige el programa de investigación matemática interdisciplinar de la Universidad de Warwick. Ha publicado más de 60 libros y es autor de la sección mensual de "Juegos matemáticos" de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA.

1. MILLARES DE LUCIERNAGAS lanzan destellos sincrónicos en esta fotografía de larga exposición de una exhibición de apareamiento nocturna. Cada insecto posee un ritmo propio, pero la visión de la luz de sus vecinos le hace entrar en sincronía con los que le rodean. Tales acoplamientos entre osciladores son el fundamento mismo de una amplia variedad de fenómenos naturales.







2. DOS RELOJES DE PENDULO situados cerca uno de otro se sincronizarán enseguida (*arriba*) a causa de minúsculas fuerzas de acoplamiento transmitidas por el aire o por vibraciones de la pared. Christiaan Huygens inventó el reloj de péndulo y fue el primero en observar este fenómeno, iniciando así el estudio de los sistemas de osciladores acoplados.

osciladores de ciclo límite. Estos incorporan un mecanismo disipativo para amortiguar las oscilaciones que adquieren excesiva amplitud y una fuente de energía para reforzar las que se hacen demasiado pequeñas.

Un oscilador individual describe una curva simple en el espacio de fases. Pero al acoplar dos o más osciladores, la gama de comportamientos posibles se torna más compleja. Las ecuaciones que rigen tales conductas tienden a resultar inabordables. Cada oscilador puede estar acoplado sólo a unos pocos vecinos inmediatos, como es el caso de los osciladores neuromusculares del intestino delgado, o hallarse acoplado a la totalidad de los osciladores de una enorme comunidad. La situación que a los matemáticos les resulta de más fácil descripción se presenta cuando cada oscilador afecta a todos los demás del sistema y la fuerza del acoplamiento aumenta con la diferencia de fase entre los osciladores. En este caso, la interacción entre dos osciladores que se mueven en sincronía es mínima.

La sincronía constituye precisamente la modalidad más familiar en la organización de osciladores acoplados. Podemos ver uno de los ejemplos más espectaculares de acoplamiento de esta clase en las rías de Malasia, Tailandia y Nueva Guinea, en los árboles de cuyas riberas se reúnen cada noche millares de machos de luciérnaga que destellan intermitentemente en sincronía, esforzándose por atraer a las hembras que cruzan por encima de ellos. Al anochecer, cuando los machos se van congregando, los destellos no están coordinados; conforme se hace noche cerrada, empiezan a formarse y crecer núcleos de sincronía. Al final hay árboles enteros que pulsan en un concierto silente e hipnótico que persiste durante horas.

Curiosamente, aunque el espectáculo de las luciérnagas ponga de manifiesto la existencia de la oscilación acoplada a gran escala, los detalles de tal fenómeno han resistido desde hace mucho las tentativas de análisis matemático. Las luciérnagas constituyen un paradigma de sistema oscilante "acoplado por impulsos": sólo interactúan cuando una ve el súbito destello de otra y modifica su ritmo en consecuencia. El acoplamiento por impulsos es fenómeno corriente en biología; pensemos en el canto de los grillos o en las neuronas, que se comunican mediante picos de tensión eléctrica llamados potenciales de acción. Pero el carácter impulsional del acoplamiento rara vez ha sido incluido en los modelos matemáticos; resulta incómodo de manejar matemáticamente, porque introduce elementos discontinuos en modelos que son continuos en los restantes aspectos, tornando inútiles con ello la mayoría de las técnicas habituales.

Recientemente, uno de los autores (Strogatz), en colaboración con Renato E. Mirollo, del Colegio Universitario de Boston, ha creado un modelo matemático idealizado para las luciérnagas y otros sistemas oscilantes acoplados por impulsos. Hemos demostrado que, en ciertas circunstancias, osciladores que son puestos en marcha en distintos momentos acaban siempre por sincronizarse [*véase* "Luciérnagas electrónicas", por Wayne Garver y Frank Moss, en "Taller y laboratorio" de este número].

Nuestro trabajo se inspiró en un estudio anterior, de Charles S. Peskin, de la Universidad de Nueva York. En 1975 Peskin propuso un modelo sumamente esquemático del marcapasos natural del corazón, que es un cúmulo de unas 10.000 células denominado nodo sinoatrial. Peskin creía que podría aclarar cómo sincronizan estas células sus ritmos eléctricos individuales al objeto de generar un latido normal.

Creó un modelo del marcapasos mediante un gran número de osciladores idénticos, acoplado cada uno con igual fuerza a todos los demás. Cada oscilador se basa en un circuito eléctrico, formado por un condensador en paralelo con una resistencia. Una corriente de entrada de intensidad constante se encarga de hacer crecer regularmente la tensión en el condensador. Conforme aumenta la diferencia de potencial entre los extremos de éste, aumenta la cantidad de corriente que pasa a través de la resistencia, por lo que el aumento de tensión va haciéndose más lento. Cuando dicha tensión alcanza cierto valor umbral, el condensador se descarga y la diferencia de potencial cae instantáneamente a cero, pauta que

remeda el disparo de una célula marcapasos y su consiguiente retorno a un nivel de referencia (la "línea de base"). La diferencia de potencial en el condensador empieza a aumentar de nuevo, y se reanuda el ciclo.

Peskin propone una forma de acoplamiento por impulsos que es fisiológicamente plausible. Cada oscilador afecta a los demás cuando se dispara. Aumenta súbitamente el voltaje de los demás en una cantidad fija; en cuanto el voltaje de una célula cualquiera rebasa el umbral, ésta se dispara de inmediato. Provisto de estas dos reglas, Peskin enunció dos conjeturas muy sugestivas. Primera, el sistema acabaría siempre por quedar sincronizado; segunda, la sincronización se alcanzaría aunque los osciladores no fueran del todo idénticos.

Cuando quiso demostrar sus conjeturas, Peskin tropezó con obstáculos técnicos insalvables. No existían procedimientos matemáticos establecidos para tratar sistemas de osciladores arbitrariamente grandes. Así que retrocedió y centró su atención en el caso más sencillo posible, a saber, dos osciladores idénticos. E incluso en este caso los problemas matemáticos eran espinosos. Restringió su problema más todavía permitiendo tan sólo impulsos y fugas de corriente por la resistencia infinitesimales. El problema se tornó manejable entonces, y consiguió demostrar su conjetura para este caso particular.

La demostración de Peskin se funda en una idea introducida por Henri Poincaré, genio matemático francés de finales del siglo pasado y principios de éste. La idea de Poincaré es el equivalente matemático de la fotografía estroboscópica. Consideremos dos osciladores idénticos, *A* y *B*, con acoplamiento impulsional, y representemos gráficamente su evolución tomando una "instantánea" cada vez que *A* se dispara.

¿Qué nos mostrará la serie de fotogramas? El oscilador *A* acaba de dispararse, por lo que siempre aparece con voltaje cero. El voltaje de *B*, por el contrario, va cambiando de un fotograma a otro. Tras resolver sus ecuaciones para el circuito, Peskin halló una fórmula explícita, aunque complicada, para la variación del voltaje *B* entre fotogramas. La fórmula revelaba que, si la tensión es inferior a un determinado valor crítico, decrecerá hasta llegar a cero, mientras que, si lo rebasa, seguirá aumentando. En cualquier caso, *B* acabará por quedar sincronizado con *A*.

Cabe una excepción. Si el voltaje de *B* es exactamente igual al voltaje crítico, no podrá ser ni aumentado ni disminuido, y permanecerá en el filo de la criticalidad. Los osciladores se dispararán repetidamente con un desfase de alrededor de medio ciclo entre sí. Pero se trata de un equilibrio inestable, como el de un lápiz que descansa sobre su punta. La más leve perturbación inclinará el sistema hacia la sincronía.

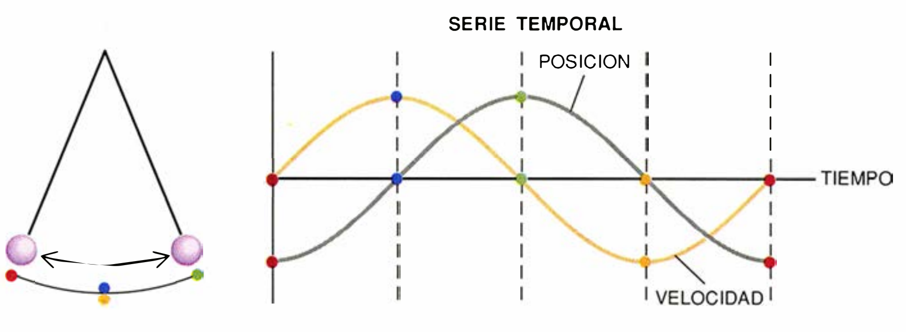
A pesar del éxito de Peskin en el análisis de dos osciladores, el caso en que el número de osciladores es arbitrario se resistió a la demostración durante unos 15 años. En 1989, Strogatz tuvo noticia del trabajo de Peskin gracias a un libro sobre osciladores biológicos de Arthur T. Winfree, de la Universidad de Arizona. Para familiarizarse con el comportamiento del modelo de Peskin, Strogatz preparó un programa de ordenador que lo simulase con un número cualquiera de osciladores y cualesquiera que fuesen los valores del impulso y de la fuga por la resistencia. Los resultados no ofrecían duda: el sistema acababa siempre disparándose al unísono.

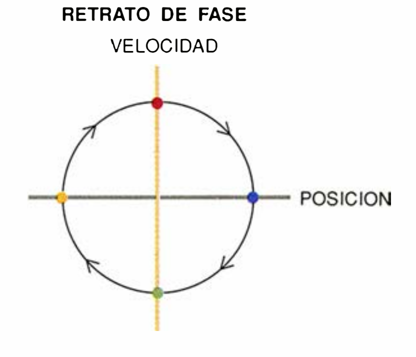
Acicateado por los resultados de la simulación, Strogatz estudió el problema con Mirollo. Repasaron juntos la demostración de Peskin para el caso de dos osciladores, y observaron que podía quedar más clara si se utilizaba un modelo más abstracto para los osciladores individuales. El parámetro clave del modelo resultó ser la curva de la tensión en el condensador (o su equivalente), desaceleradamente ascendente hacia el umbral de disparo; carecían de importancia las otras características.

Mirollo y Strogatz demostraron que su sistema generalizado llega a sincronizarse siempre, cualquiera que sea el número de osciladores y para casi todas las condiciones iniciales. La demostración se fundamenta en la noción de "absorción", abreviatura para la idea de que, si un oscilador impulsa a otro por encima del umbral, ambos permanecerán sincronizados por siempre. Después de todo, poseen idéntica dinámica y es idéntico su acople a todos los demás. Ambos investigadores demostraron que una secuencia de procesos de absorción acaba por concatenar y hacer conjuntamente solidarios a todos los osciladores.

Aunque la sincronía constituye el caso más sencillo de osciladores idénticos acoplados, la sincronización no es inevitable. En realidad, es frecuente que osciladores acoplados no lleguen a sincronizarse. La explicación reside en la ruptura de la simetría, fenómeno en el cual un estado simétrico individual —como la sincronía— queda reemplazado por varios estados menos simétricos, que tomados juntos reintegran la simetría original. Los osciladores acoplados constituyen una fuente caudalosa de ruptura de la simetría.

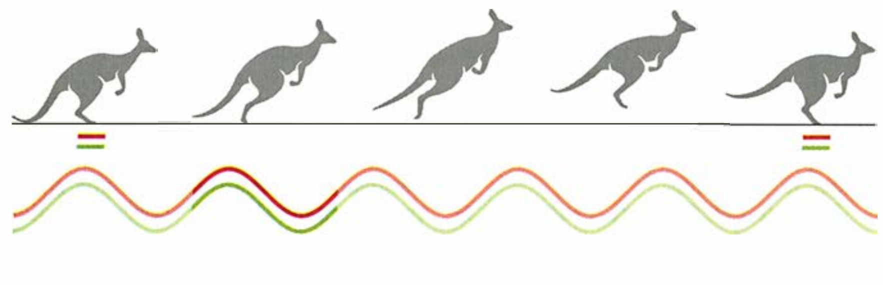
La sincronía constituye el caso más evidente de la concatenación de fase (*phase locking*), efecto general en el que muchos osciladores se amoldan a un mismo patrón, pero no necesariamente llevando un mismo paso. Al acoplar dos osciladores idénticos caben justo dos posibilidades: la sincronía, con diferencia de fase igual a cero, y la antisincronía, donde la diferencia de fase es medio ciclo. Por ejemplo, cuando un canguro avanza a saltos a través de la llanura austra-



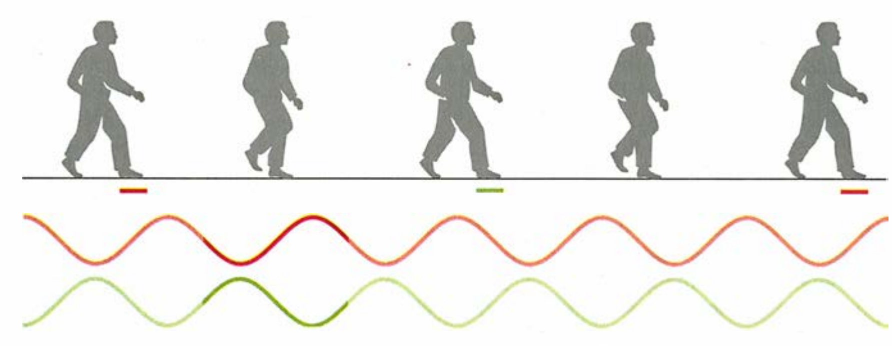


3. REPRESENTACION del movimiento periódico mediante una serie temporal y mediante un retrato de fase. El retrato de fase conjuga la posición y la velocidad, con lo que muestra la gama completa de estados que puede presentar un sistema. Todo sistema que exhiba comportamiento periódico, por complicado que sea, acabará por describir una curva cerrada en el espacio de fases.

a DOS EN SINCRONIA



b DOS EN ANTISINCRONIA



c TRES EN SINCRONIA



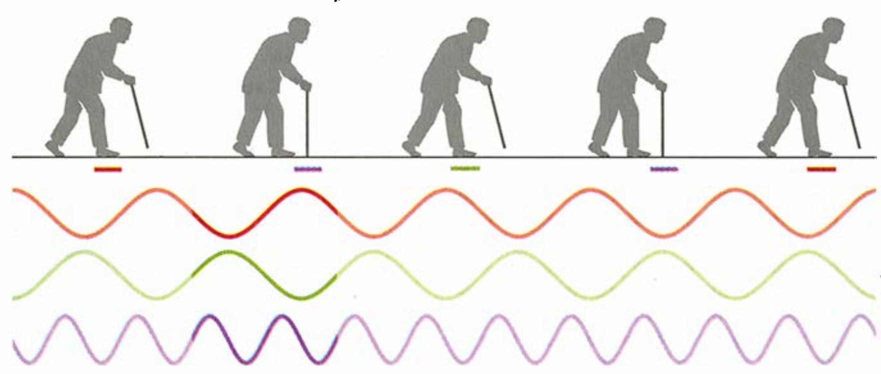
d TRES DESFASADOS UN TERCIO DE CICLO



e DOS EN SINCRONIA, UNO POR SU CUENTA



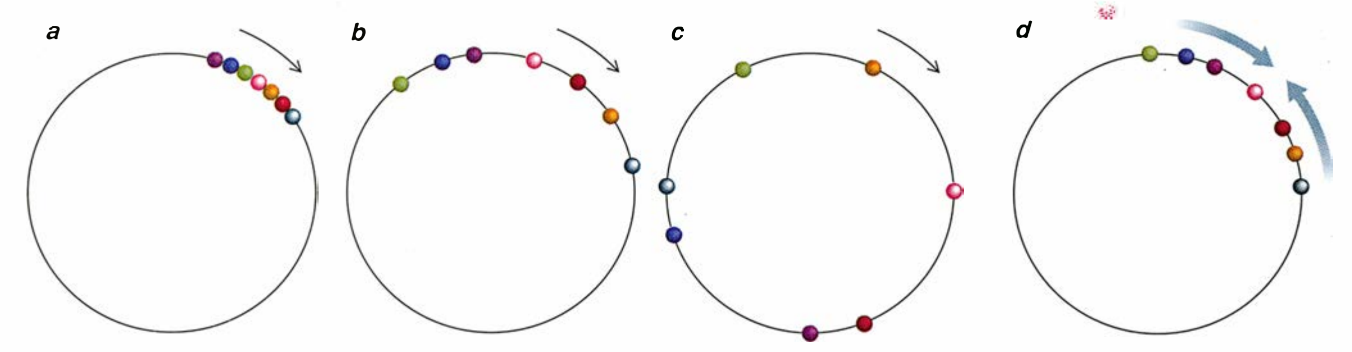
f DOS EN SINCRONIA Y UNO CON RAPIDEZ DOBLE



4. LA RUPTURA DE SIMETRIA gobierna el comportamiento de los osciladores acoplados. La sincronía corresponde al estado individual más sencillo posible; ahora bien, siendo variable la intensidad del acoplamiento entre osciladores, pueden presentarse otros estados. Dos osciladores pueden acoplarse bien sincrónicamente, bien en antisincronía, casos que se corresponden más o menos con la locomoción bípeda de los canguros (*a*) y las personas (*b*). Tres osciladores pueden acoplarse de cuatro maneras: en sincronía (*c*), cada uno desfasado un tercio de ciclo respecto a los otros (*d*), dos sincronizados y otro cuya fase varía independientemente (*e*) o con el curioso ritmo de dos osciladores antisincrónicos de la misma frecuencia y un tercero de frecuencia doble (*f*). Esta última pauta corresponde también a la ambulación de una persona que camina despacio ayudándose de un bastón.

liana, sus poderosas patas traseras oscilan de manera periódica y golpean el suelo al mismo tiempo. En cambio, si un humano corre tras el canguro, sus pies van tocando el suelo alternativamente. El abanico de posibilidades se amplía cuando la red consta de muchos osciladores. En 1985, uno de los autores (Stewart), en colaboración con Martin Golubitsky, de la Universidad de Houston, desarrolló una clasificación matemática de las pautas de las redes de osciladores acoplados, prosiguiendo trabajos anteriores de James C. Alexander, de la Universidad de Maryland, y de Giles Auchmuty, de la Universidad de Houston.

La clasificación resulta de conjugar la teoría de grupos (que se ocupa de las simetrías de una colección de objetos) con la bifurcación de Hopf (una descripción generalizada de la manera en que los osciladores se "ponen en marcha"). En 1942, Eberhard Hopf estableció una descripción general del arranque de la oscilación. Hopf empezó considerando sistemas que poseen un punto de reposo en el espacio de fases (un estado estacionario) y estudió lo que ocurría al aproximar mediante una función lineal sencilla el movimiento de tales sistemas en las cercanías de ese punto. Las ecuaciones que describen ciertos sistemas se comportan de una forma peculiar cuando el sistema es apartado de su punto de reposo. En lugar de regresar lentamente hacia el equilibrio o de alejarse rápidamente de él, hacia la inestabilidad, oscilan. El punto donde se produce esta transición se llama punto de bifurcación porque el comportamiento del sistema se escinde en dos ramas: un estado de reposo ines-



5. UN SISTEMA DE OSCILADORES no idénticos que arranquen en fase (como en el círculo *a*, donde 360 grados corresponden a una oscilación) irá perdiendo coherencia a medida que se adelanten los más rápidos y se retrasen los más lentos (*b*, *c*). Una sencilla fuerza de acoplamiento que acelere a los más lentos y frene a los más rápidos los mantendrá en fase (*d*).

table coexiste con una oscilación estable. Hopf demostró que los sistemas cuya forma linealizada experimenta este tipo de bifurcaciones son osciladores de ciclo límite: poseen amplitud y forma de onda preferidas. Stewart y Golubitsky demostraron que la idea de Hopf puede ser extendida a sistemas de osciladores acoplados idénticos, cuyos estados experimentan bifurcaciones que producen configuraciones estándar de concatenación de fase.

Por ejemplo, tres osciladores idénticos acoplados en un anillo admiten cuatro configuraciones básicas de concatenación de fase. En la primera, todos los osciladores se mueven sincrónicamente; en la segunda, las fases de los tres osciladores difieren entre sí en un tercio; en la tercera, dos de los osciladores se mueven sincrónicamente mientras el tercero lo hace a su aire (con la salvedad de que oscila con el mismo período que los demás); en la cuarta, dos osciladores se mueven con un desfase de un semiciclo y el tercero oscila con rapidez doble que la de sus vecinos.

Las extrañas oscilaciones desfasadas un semiperíodo que se presentan en la cuarta configuración sorprendieron al principio incluso a Stewart y Golubitsky, pero la verdad es que tal pauta se da en la vida real. Una persona que se ayuda de un bastón para caminar avanza precisamente así: pierna derecha, bastón, pierna izquierda, bastón, repetición. El tercer oscilador está, en cierto sentido, gobernado por los efectos combinados de los otros dos: cada vez que uno de éstos alcanza un máximo le da un impulso al tercero. Al hallarse los dos primeros osciladores en antisincronía, el tercer oscilador alcanza dos picos en el lapso en que cada uno de los otros dos alcanza sólo uno.

La teoría de la bifurcación de Hopf simétrica permite clasificar los patrones de concatenación de fase correspondientes a muchas redes diferentes de osciladores acoplados. Stewart, en colaboración con James C. Collins, de la Universidad de Boston, ha estado investigando las llamativas analogías entre estos patrones de concatenación de fases y las simetrías que presentan las distintas formas de marcha —el paso, el trote, el galope— de los animales.

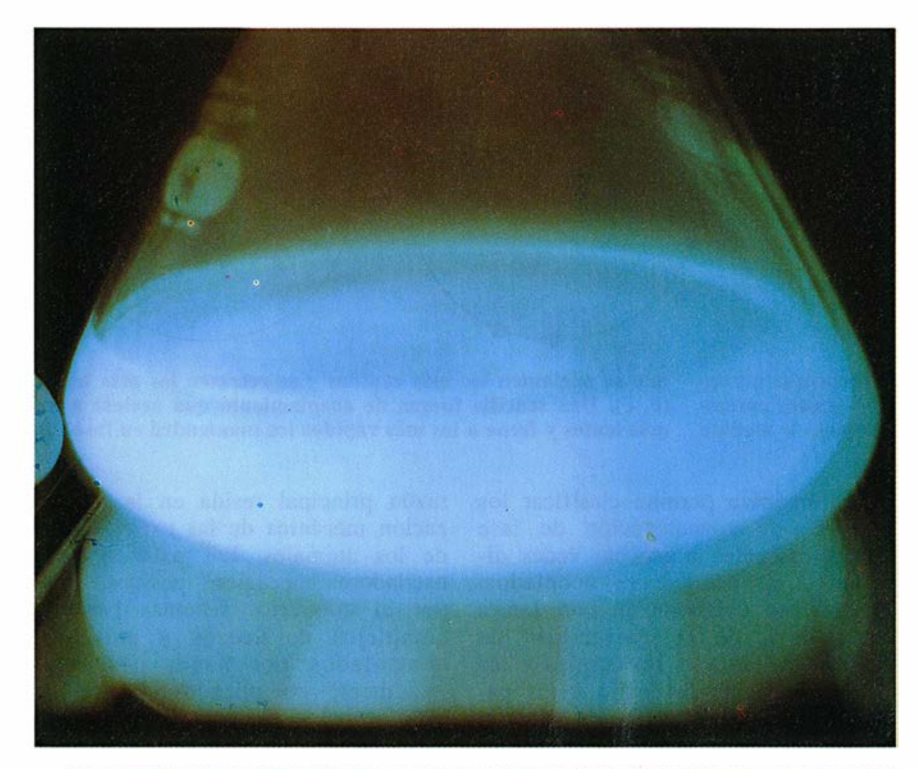
La marcha de los cuadrúpedos se asemeja a los patrones naturales de los sistemas de cuatro osciladores acoplados. Un conejo, al saltar, mueve juntas y a la vez las patas delanteras y hace después otro tanto con las traseras. La diferencia de fase entre las dos patas delanteras es nula, y de un semiciclo entre ellas y las traseras. Las jirafas se mueven de forma parecida, sólo que son las patas delantera y trasera del mismo lado las que se mueven a la vez. En un caballo que marcha al trote la concatenación se produce en diagonal. Un elefante avanza alzando por turno cada pata, con diferencias de fase de un cuarto en cada etapa. Y las gacelas jóvenes completan el grupo de simetrías con el bote, un salto en el cual las cuatro patas se mueven en sincronía [*véase* "Juegos matemáticos," por Ian Stewart, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1991].

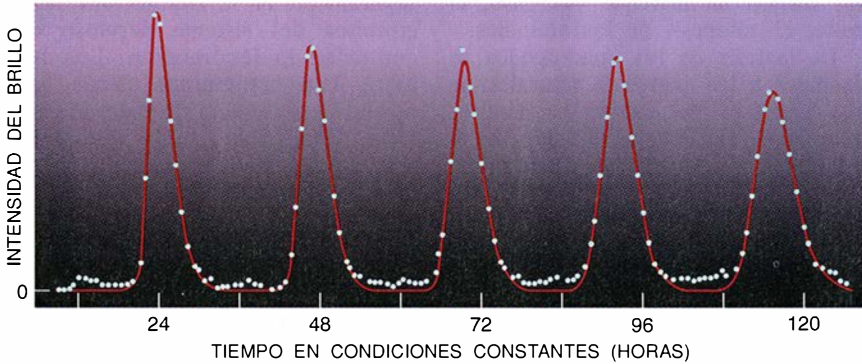
Más recientemente, Stewart y Collins han generalizado su análisis al movimiento hexápodo de los insectos. La ambulación de la cucaracha, trípode a trípode, constituye una configuración muy estable en un anillo de seis osciladores. El triángulo de las patas delantera y trasera izquierda y la central derecha se mueve en sincronía, y luego se alzan las otras tres patas con una diferencia de fase de un semiciclo.

¿A qué se debe este parecido entre los andares de los animales y las configuraciones de los osciladores acoplados? Es poco verosímil que la razón principal resida en la organización mecánica de las extremidades de los animales. Las patas no son osciladores mecánicos pasivos, sino, por el contrario, sistemas bastante complejos de huesos y músculos controlados por haces nerviosos igualmente complicados. La fuente más probable de esta concordancia entre naturaleza y matemática yace seguramente en la arquitectura de los circuitos del sistema nervioso que controlan la locomoción. Los biólogos han conjeturado desde hace mucho la existencia de redes de neuronas acopladas, a las que denominan generadoras de pautas centrales, pero tal hipótesis ha sido siempre objeto de controversia. No obstante, es frecuente que las neuronas actúen como osciladores; en tal caso, si de verdad existiesen las redes generadoras de pautas centrales, sería razonable suponer que sus dinámicas se asemejaran a las de una red de osciladores.

Además, el análisis de simetrías resuelve un importante problema planteado por la hipótesis del generador de pautas centrales. Casi todos los animales se valen de diversos andares; por ejemplo, los caballos pueden andar, ir al paso, al trote corto o largo y galopar, y los biólogos han venido suponiendo que cada una de estas formas de marcha corresponde a un generador de pautas particular. La ruptura de la simetría entraña, sin embargo, que el mismo circuito generador de pautas centrales pueda producir todas las formas de ambulación de un animal. Lo único que ha de variar es la intensidad de los acoplamientos entre los osciladores neuronales.

Hasta aquí, nuestro análisis se ha limitado a colecciones de osciladores estrictamente idénticos. Tal idealización resulta conveniente desde el punto de vista matemático, pero no tiene en cuenta la diversidad omni-





6. LAS ALGAS LUMINISCENTES *Gonyaulax* (*arriba*) modifican la intensidad de su fulgor atendiendo a un reloj interno que es afectado por la luz. Si se las mantiene constantemente en luz tenue, la temporización del fulgor se hace menos precisa debido a que el acoplamiento entre los organismos individuales no basta para mantenerlos en sincronismo (*abajo*).

presente en biología. En una población real cualquiera, habrá siempre osciladores que sean más rápidos o más lentos que otros. El comportamiento de comunidades de osciladores cuyos miembros tienen diferentes frecuencias depende de la intensidad del acoplamiento entre ellos. Si sus interacciones son demasiado débiles, los osciladores no podrán alcanzar la sincronía; el resultado es la incoherencia, una cacofonía de oscilaciones. Aun cuando comiencen al unísono, los osciladores irán exhibiendo desfases progresivamente más acusados, como los relojes de Huygens al ser colocados en lugares opuestos de la habitación.

Las colonias del alga bioluminiscente *Gonyaulax* exhiben este tipo de sincronización. El grupo de J. Woodland Hastings, de la Universidad de Princeton, ha descubierto que, si un tanque lleno de *Gonyaulax* se mantiene en el laboratorio bajo una luz tenue persistente, las algas exhiben un fulgor de ritmo circadiano cuyo período ronda las 23 horas. Con el paso del tiempo, la forma de onda se hace más ancha y dicho ritmo va amortiguándose gradualmente. Las células individuales siguen oscilando, pero van saliéndose de fase a causa de diferencias en sus frecuencias naturales. El fulgor de las algas no mantiene el sincronismo en ausencia de la luz solar.

En otras comunidades de osciladores el acoplamiento tiene la intensidad suficiente para vencer las inevitables diferencias entre sus frecuencias naturales. Norbert Wiener señaló, a finales de los años cincuenta, que tales comunidades de osciladores son ubicuas en el mundo biológico y, en realidad, en toda la naturaleza. Wiener trató de desarrollar un modelo matemático para colecciones de osciladores, pero su método no ha resultado fructífero. El avance teórico se produjo en 1966, cuando Winfree, que era por entonces posgraduado en la Universidad de Princeton, comenzó a explorar el comportamiento de poblaciones grandes de osciladores de ciclo límite. Winfree se valió de una acertada combinación de simulaciones computarizadas, de análisis matemáticos y de experimentos con una formación de 71 osciladores compuestos por lamparitas de neón y eléctricamente acoplados.

Winfree simplificó el problema al hacer notar que, cuando los osciladores están débilmente acoplados, permanecen en todo momento cerca de sus ciclos límite. Esta idea le permitió dejar de lado las variaciones de amplitud y concentrarse en las variaciones de fase de los osciladores. Para tener en cuenta las diferencias entre éstos, Winfree construyó un modelo que capturaba la esencia de una comunidad de osciladores, en el cual suponía que las frecuencias naturales de los osciladores tienen una distribución probabilística estrecha, siendo los osciladores idénticos en todos los demás aspectos. En una simplificación última y crucial, Winfree supuso que cada oscilador sufre sólo la influencia del ritmo colectivo producido por todos los demás. En el caso de las luciérnagas, ello significaría que cada luciérnaga responde al fulgor colectivo de la población y no al de luciérnagas singulares.

Para ilustrar el modelo de Winfree, imaginemos un pelotón de puntos que corren alrededor de un círculo. Los puntos representan las fases de los osciladores y el círculo, el ciclo límite común. Si los osciladores fuesen independientes, todos los puntos acabarían dispersos por el círculo y el ritmo colectivo se degradaría hasta anularse. Reina la incoherencia. Sin embargo, una regla sencilla de interacción entre osciladores puede restaurar la coherencia: si un oscilador va en cabeza del pelotón, que se retrase un poco; si va detrás, que acelere.

En ciertos casos, el acoplamiento correctivo es capaz de superar las diferencias de frecuencia natural; en otros (como el de *Gonyaulax*), no lo consigue. Winfree descubrió que el comportamiento del sistema depende de la amplitud de la distribución de frecuencias. Si la dispersión de las frecuencias es grande en compara-

ción con el acoplamiento, el sistema acaba siempre cayendo en la incoherencia, como si no estuviera acoplado en absoluto. Al descender la dispersión por debajo de un umbral crítico, parte del sistema se "congela" espontáneamente en sincronía.

La sincronización emerge de forma cooperativa. Si llega a producirse el sincronismo de unos cuantos osciladores, su señal conjunta y coherente se eleva sobre el ruido de fondo y ejerce un efecto más vigoroso sobre los demás. Al ser arrastrados nuevos osciladores al núcleo sincronizado, la señal de éste resulta amplificada. Esta realimentación positiva desemboca en una acelerada instauración de la sincronía. No obstante, algunos osciladores siguen sin incorporarse al sistema sincrónico, porque sus frecuencias distan demasiado del valor en que se han sincronizado los restantes y el acoplamiento no puede hacerlos entrar en el redil.

Al desarrollar esta descripción, Winfree descubrió un inesperado nexo entre la física y la biología. Se dio cuenta de que la sincronización mutua evocaba una transición de fase, como la congelación del agua o la imantación espontánea de un material ferromagnético. La anchura de la distribución de frecuencias de los osciladores desempeña el mismo rol que la temperatura, y la alineación de fases de los osciladores en el tiempo es el equivalente de la alineación en el espacio de las moléculas o de los espines electrónicos.

La analogía con las transiciones de fase abrió un nuevo capítulo de la mecánica estadística, que estudia los sistemas compuestos por enormes números de subunidades que interactúan entre sí. En 1975, Yoshiki Kuramoto, de la Universidad de Kyoto, presentó una elegante reformulación del modelo de Winfree. El modelo de Kuramoto posee una estructura matemática más sencilla, lo que permite analizarlo con gran detalle. Strogatz, junto con Mirollo y Paul C. Matthews, de la Universidad de Cambridge, hallaron una insospechada relación entre el modelo de Kuramoto y la atenuación de Landau, un fenómeno desconcertante que se da en física de plasmas al propagarse ondas electrostáticas a través de un medio sumamente enrarecido. La conexión surgió cuando estudiamos la degradación hacia la incoherencia en comunidades de osciladores cuya distribución de frecuencias es demasiado amplia para poder mantener la sincronía. Resulta que esa pérdida de coherencia está gobernada por el mismo mecanismo matemático que controla la degradación de ondas en tales plasmas "sin colisiones".

La teoría de osciladores acoplados ha recorrido un largo trecho desde que Huygens observó la sincronización espontánea de los relojes de péndulo. La sincronización, que parece a primera vista una conducta muy natural, se torna a un tiempo sorprendente e interesante. Constituye un problema que es preciso desentrañar, un problema que no es consecuencia obvia de la simetría. Los matemáticos se han dirigido a la teoría de ruptura de la simetría para clasificar las pautas generales que surgen al acoplar osciladores idénticos que sean ostensiblemente simétricos. Así pues, una disciplina matemática que tiene sus raíces más visibles en la física de partículas parece gobernar el salto de las gacelas y la pesada marcha de los elefantes.

Entretanto, técnicas tomadas de la mecánica estadística iluminan el comportamiento de poblaciones enteras de osciladores. Resulta sorprendente que pueda existir un enlace entre el mundo violento de los plasmas, donde los átomos se ven de ordinario despojados de sus electrones, y el pacífico mundo de los osciladores biológicos, en el que las luciérnagas, en las riberas, lanzan con silenciosa intermitencia destellos luminosos. Y, no obstante, existe un hilo matemático coherente que lleva desde el péndulo simple hasta las pautas espaciales, las ondas, el caos y las transiciones de fase. Tal es el poder que tiene la matemática de revelar la unidad oculta de la naturaleza.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE TIMING OF BIOLOGICAL CLOCKS. Arthur T. Winfree. Scientific American Library, 1987.

FROM CLOCKS TO CHAOS; THE RYTHMS OF LIFE. Leon Glass y Michael C. Mackey. Princeton University Press, 1988.

SYNCHRONIZATION OF PULSE-COUPLED BIOLOGICAL OSCILLATORS. Renato E. Mirollo y Steven H. Strogatz, en *SIAM Journal on Applied Mathematics*, vol. 50, numero 6, págs. 1645-1662; diciembre de 1990.

COUPLED NONLINEAR OSCILLATORS BELOW THE SYNCHRONIZATION THRESHOLD: RELAXATION BY GENERALIZED LANDAU DAMPING. Steven H. Strogatz, Renato E. Mirollo y Paul C. Matthews en *Physical Review Letters*, vol. 68, número 18, páginas 2730-2733; 4 de mayo de 1992.

COUPLED NONLINEAR OSCILLATORS AND THE SYMMETRIES OF ANIMAL GAITS. J. J. Collins y Ian Stewart en *Journal of Nonlinear Science*, volumen 3, número 3, páginas 349-392; julio de 1993.

Cultos funerarios de Malta

Las nuevas excavaciones arqueológicas revelan que en las sociedades isleñas se desarrolló una honda preocupación religiosa sobre la vida y la muerte a medida que experimentaban la degradación del entorno

Caroline Malone, Anthony Bonanno, Tancred Gouder, Simon Stoddart y David Trump

La región mediterránea, cuna de religiones, constituye un óptimo laboratorio para el estudio científico de las antiguas creencias. ¿Quién no ha oído hablar de la mitología griega y del culto que recibían los emperadores romanos? Eran religiones de ciudades-estado, no muy distantes de nuestras propias sociedades modernas. Menos conocidas son las religiones de las comunidades agrícolas que precedieron a la civilización grecorromana.

En varias de estas últimas, las imágenes de figuras humanas corpulentas desempeñaban un papel notable. Ante la forma femenina evidente de algunas, es común entre los arqueólogos hablar de "matronas" para aludir a ellas, y las asocian con la celebración de la fecundidad humana y fertilidad de las cosechas. En un grupo de islas, las que constituyen el archipiélago de Malta, dichas figuras se convirtieron en el objeto de una exaltación que estuvo muy vinculada a la construcción en piedra de los primeros edificios públicos independientes.

Esos templos y las cámaras funerarias subterráneas con ellos relacionadas contenían muchas imágenes de seres humanos obesos —algunas no superiores a unos centímetros, otras gigantescas—, así como de animales y símbolos fálicos. Durante los trabajos de excavación dirigidos por los autores se han logrado espectaculares descubrimientos sobre las representaciones artísticas de la "diosa madre". Estos hallazgos han arrojado nueva luz sobre la evolución de ciertas prácticas religiosas en Malta y, quizá, sobre la causa de su desaparición. Sugieren que la religión abarcaba mucho más que un culto de fecundidad humana. Revelan también una aleccionadora moraleja sobre lo que sucede cuando un pueblo concentra demasiada energía en la vida votiva en vez de poner su empeño en procurar su sustento.

Desde siempre, los descubrimientos arqueológicos de Malta se han interpretado (o malinterpretado) con el telón de fondo de la primacía otorgada a la diosa madre. Las figurillas que encajan en esa descripción general datan de una fecha que va desde el Paleolítico Superior (hace unos 25.000 años) hasta la aurora de las sociedades neolíticas que conocieron los metales. Se han encontrado algunas, pocas, en la Europa occidental, pero la cosecha ha sido mucho más rica en los yacimientos de Egipto, Levante, Turquía, Grecia, Chipre y los Balcanes. Las figuras más elaboradas proceden del archipiélago maltés, del tercer milenio a.C.

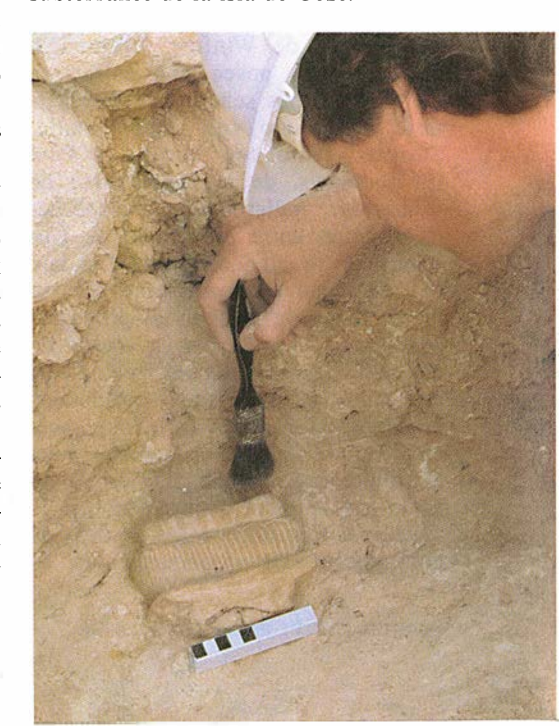
Por culpa de las formas heterodoxas empleadas en su recuperación, muchas de esas figurillas han aportado menos información de lo que podrían haber ofrecido. La datación de las figuras es a menudo imprecisa, e incompletos los registros sobre el lugar y el modo en que se hallaban, razón por la cual no podemos saber si pertenecían a los sepulcros, los santuarios o las casas. En los Balcanes se guardaban en hornacinas abiertas en las paredes de las casas. En Turquía, en el yacimiento del asentamiento de Catal Hüyük (octavo milenio a.C.), las figurillas de arcilla y piedra más elaboradas estaban asociadas con sepulturas de personalidades de alto rango en santuarios especiales, mientras que las más toscas aparecieron en las casas.

El descubrimiento de figurillas similares en yacimientos distantes y de eras dispares inspiró una larga tradición de especulación erudita sobre una religión prehistórica generalizada basada en el culto de la diosa madre. A mediados de este siglo, hubo quien se propuso demostrar que se había propagado por todo el Mediterráneo un culto a la Diosa del Ojo (llamada así por los motivos oculares encontrados en los ídolos mesopotámicos). Más tarde se defendió que los Balcanes constituyeron el centro de una antigua religión europea.

Los prehistoriadores aceptan hoy que los cultos de la antigüedad diferían radicalmente de una sociedad a otra y que los cultos de la vida doméstica divergían de los ritos funerarios. El ejemplo de Malta corrobora semejante diversidad. En la cuenca mediterránea, los cultos solían limitarse a rituales domésticos austeros. En Malta, sin embargo, la adoración de sus imágenes macizas se fue transformando paulatinamente en una pasión arrolladora. Esta fijación pudo arraigar, a buen se-

CAROLINE MALONE, ANTHONY BONANNO, TANCRED GOUDER, SIMON STODDART y DAVID TRUMP han excavado las ruinas de la antigua civilización maltesa y modificado las ideas que se tenían de la misma. Malone y Stoddart enseñan arqueología en la Universidad de Bristol; Bonanno, en la de Malta. Gouder dirige el Museo Nacional de Malta. Trump profesa en la Universidad de Cambridge.

1. PAREJA SENTADA de figuras humanas (*página opuesta*), que ha promovido la revisión de las hipótesis defendidas sobre la prehistoria maltesa. La estatua fue desenterrada (*abajo*) en un complejo funerario subterráneo de la isla de Gozo.



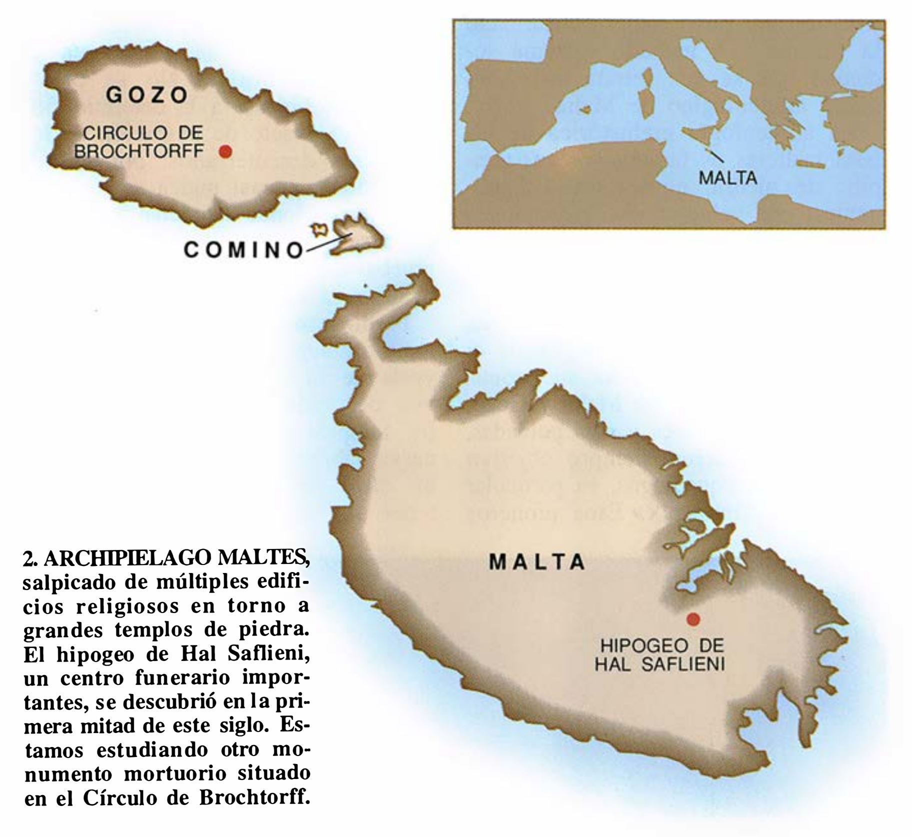
guro, por las condiciones allí reinantes, que permitían el desarrollo de una sociedad cerrada, aislada e introvertida.

El roqueño archipiélago, pelado y montuoso, no parece hoy lugar hospitalario para el asentamiento de comunidades agrícolas. De vegetación y suelo escasos, el suministro de agua dulce constituye un auténtico problema. Pero el registro geológico sugiere que, hace de 5000 a 7000 años, los primeros habitantes hallaron un marco más atractivo; éstos no tardarían mucho en despojar paisaje tan frágil de su vegetación. Después, una erosión pertinaz fue mermando la potencia productiva de las islas. La fragilidad ambiental resultante haría impredecible el rendimiento de la agricultura. Esta tensión pudo haber conformado la extraña y a menudo extrema sociedad que se nos retrata en el registro arqueológico de Malta.

La arqueología prehistórica de las islas maltesas es famosa por sus templos de piedra, numerosos e imponentes: una veintena de agrupaciones templarias salpican la isla, formadas la mayoría por dos o tres estructuras macizas. La datación por carbono radiactivo revela que se edificaron en el transcurso de un milenio, desde el 3500 al 2500 a.C. Dada su prominencia en el paisaje de Malta y Gozo, las dos islas mayores y más pobladas, los templos fueron siempre objetivo claro de los arqueólogos, en particular durante el siglo XIX. Esos pioneros limpiaron los escombros mucho antes de que se hubiera desarrollado la arqueología científica. No se prestó atención suficiente a la determinación del punto exacto de ubicación de los artefactos desenterrados; por lo que aquí interesa, casi nunca se indicaba el contexto donde aparecían los ídolos. Poco se puede hacer ahora con estas pruebas incompletas, aparte de apreciar la destreza de los escultores.

Permanece la arquitectura de los templos, aunque vaciados en su mayoría de imágenes de culto y motivos decorativos. De diseño regular, los templos constan de una fachada curva labrada en piedra que domina un atrio abierto. La fachada suele tener una entrada formal, delimitada





2. ARCHIPIELAGO MALTES, salpicado de múltiples edificios religiosos en torno a grandes templos de piedra. El hipogeo de Hal Saflieni, un centro funerario importantes, se descubrió en la primera mitad de este siglo. Estamos estudiando otro monumento mortuorio situado en el Círculo de Brochtorff.



por enormes piedras esculpidas y una losa de recubrimiento, que introduce en un corredor central. Absides lobulados, central y laterales, se abren a esa nave, a modo de hoja de trébol. Los ábsides abrigaban altares de piedra (labrados con motivos geométrico-espirales o animales) y presentaban paredes y suelos cuidadosamente enyesados, y pintados, igual que otros motivos decorativos, de un ocre rojo; importaban el pigmento de Sicilia. Había también agujeros para travesaños, que en algunos casos servían para colgar los animales de las paredes, y agujeros en el suelo para el desagüe de líquidos. Se encontraron abundantes huesos de animales, de oveja y cabra sobre todo, junto con cuencos para beber y afilados cuchillos de pedernal. Hallazgos que evocan rituales de sacrificios y banquetes.

En los templos de Tarxien pervivió cierta información sobre la disposición del mobiliario; excavados entre 1915 y 1919, se recuperó la mitad inferior de una enorme estatua de una "señora gorda" en el recinto cultual. A su lado había un altar, en cuyo interior quedaban restos de alimento. El altar miraba hacia figuras de animales esculpidos, probablemente motivos sacrificiales. Ahondando más en el templo, se recuperaron imágenes humanas, sacerdotes se supone, escondites de colgantes preciosos e incluso maquetas arquitectónicas de los templos.

El descubrimiento en 1902 del hipogeo, o cámara funeraria subterránea, de Hal Saflieni añadió otra dimensión a los cultos de la Malta primitiva. Los albañiles tropezaron con este extraordinario yacimiento mientras excavaban sótanos y cimientos para erigir nuevos edificios en la cercana ciudad de Pawla. Antes de que llegara ningún arqueólogo experto, se había vaciado la mayoría de las cámaras sin inventariar su contenido; el rico conjunto de restos humanos y ofrendas funerarias que encerrasen acabaría abonando los campos de los alrededores. Por fin, el encargado del Museo Nacional de Malta, Themistocles Zammit, realizó un estudio del hipogeo años más tarde. Intentó recuperar cuanta información pudo de las cámaras casi vacías excavadas en roca.

Zammit calculó que en las 32 cámaras del hipogeo había sido inhumado un número increíble de individuos: entre 6000 y 7000, enterrados con ofrendas funerarias de ollas, herramientas de obsidiana y pedernal, colgantes de cuentas y piedra, y figuras en arcilla y piedra de personas obesas y de animales. Una de las figuras más llamativas es la Señora Durmiente del hipogeo. Esta estatuilla muestra una rotunda mujer tendida sobre un costado en un lecho muy trabajado, que viste faldones fruncidos y cuyo pelo está recogido en un moño acicalado.

Pasillos y cámaras del yacimiento se parecían a los templos construidos en la superficie: bloques de roca verticales conectados por dinteles, peldaños, agujeros de goznes para cancelas y quizá motivos pictóricos. No obstante, la función principal del hipogeo era claramente la sepulcral, como atestiguan los miles de huesos, aunque podría tratarse de algo más que de una tumba enorme. Su forma laboriosamente labrada, tan similar en diseño a la de los templos, apunta a que constituía un templo para la muerte, centro de celebración de ritos funerarios y de ultratumba.

El gran número de figurillas procedentes de ambos templos y el ornamentado hipogeo sepulcral de Hal Saflieni han alimentado ideas (algunas plausibles, otras fantásticas) sobre los supuestos cultos y rituales malteses

de la fecundidad. Según ciertos arqueólogos, la sociedad maltesa habría sido un poderoso matriarcado dominado por sacerdotisas, jefes femeninos y diosas madres; basábase ese enfoque en una fe implícita en el significado de los artefactos, aunque muy desasistida de fundamento científico.

A lo largo de los últimos cinco años, nuevas excavaciones en el yacimiento del Círculo de Brochtorff en Gozo han puesto al descubierto claves decisivas sobre los rituales prehistóricos de la muerte. El Círculo de Brochtorff, un recinto megalítico ubicado en la cima del altozano de Xaghra, fue descubierto en los años veinte del siglo pasado por Otto Bayer. Vagos documentos históricos sugieren que su hallazgo fue seguido de la típica caza del tesoro fortuito. Afortunadamente un artista maltés, Charles Brochtorff, hizo varios bocetos mientras se trabajaba en el yacimiento. Sus precisas y detalladas acuarelas y grabados nos muestran un yacimiento compuesto por una pared de piedra y una entrada que rodean un enorme y escabroso agujero en el centro; varios megalitos también se alzan dentro del recinto. En uno de los bocetos aparece un hombre asomándose del agujero y sosteniendo algo muy parecido a un esqueleto humano.

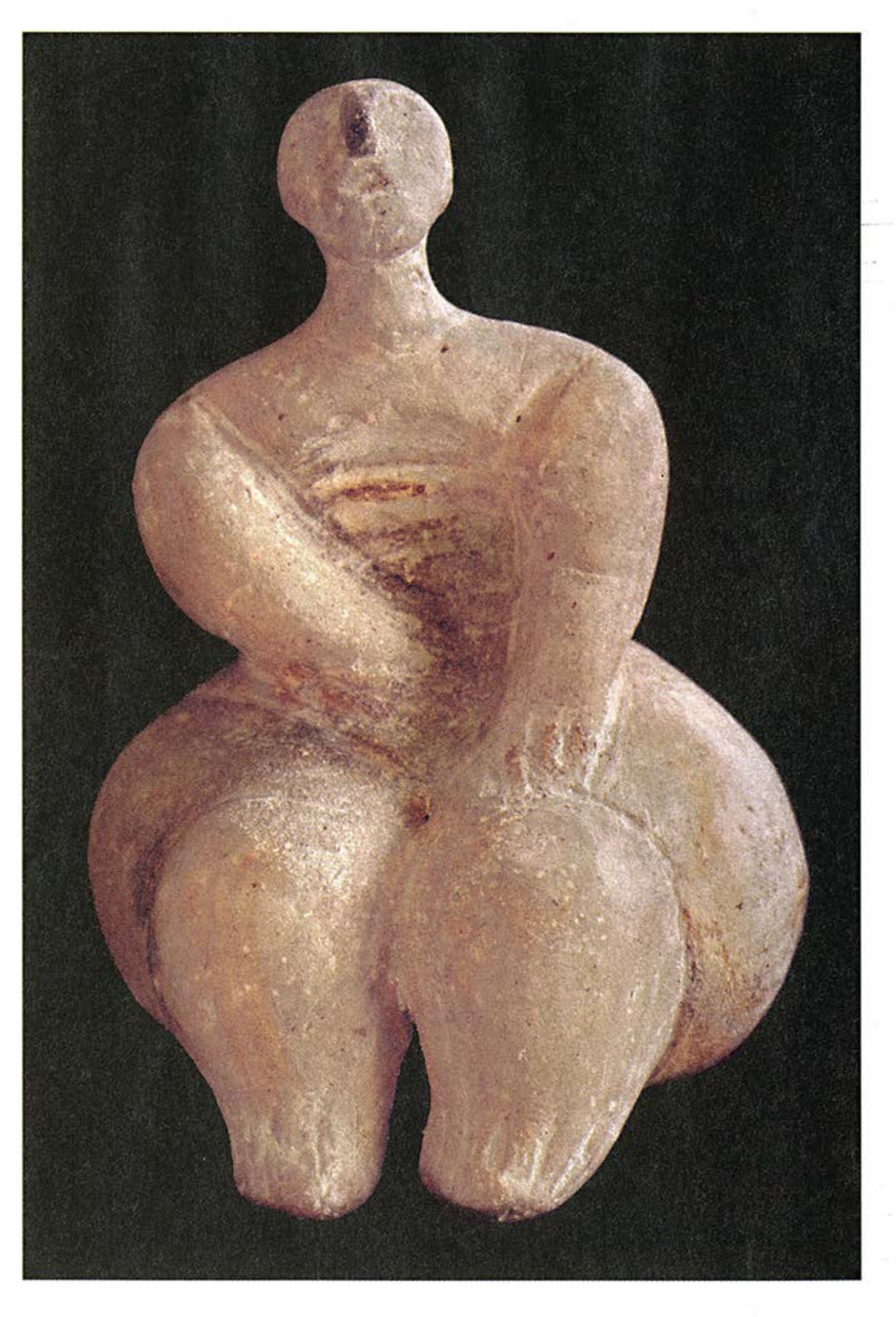
Esta serie de pinturas, la única pista que sugería la existencia de un yacimiento arqueológico en el cerro aplanado, sirvió de punto de partida para nuestro equipo, que se dispuso a redescubrir todo lo que quedara bajo el suelo mesetario. Mediante técnicas avanzadas, así el radar para detectar estructuras subterráneas, realizamos estudios topográficos y geofísicos del área para conocer la naturaleza de la roca enterrada. En 1987 conseguimos localizar la excavación Bayer dentro de un círculo que había sido encontrado 20 años antes.

Desde entonces, se han invertido meses de duro trabajo reexcavando el yacimiento. Sobre una superficie de unos mil metros cuadrados, tuvimos que retirar no sólo el material de relleno del siglo XIX, sino también la grava de los desplomes que habían cegado varias cavidades naturales situadas a más de cuatro metros de profundidad. Tras cinco campañas, teníamos clara la naturaleza del yacimiento; el número cuantioso de artefactos y restos humanos confirmaban su importancia.

Fresca la memoria de los saqueos anteriores, nos esforzamos por excavar con los métodos rigurosos que la ciencia nos ofrece. Anotamos y fotografiamos cada objeto o dato en el nivel de base de las cuevas *in situ* y desde varias direcciones, para obtener un registro tridimensional de su ubicación y postura. Se tomaron muestras para datación y para estudios del entorno local y la estratigrafía fina del yacimiento. Nos servimos de la paleoantropología para reconstruir el perfil de la población humana enterrada. Creamos registros informáticos minuciosos.

A diferencia del magno hipogeo de Hal Saflieni de Malta, de cámaras esculpidas artificiales, el yacimiento de Brochtorff de Gozo consta de cuevas naturales con numerosas cámaras conectadas entre sí. La erosión y, tal vez, los terremotos han agrietado el endeble techo rocoso de las cuevas, con desprendimientos de cientos de metros cúbicos de roca y consiguiente mezcolanza de estancias arqueológicas. Las cuevas empezaron a desmoronarse hace ya 5000 años. La comunidad prehistórica, que llevaba unos mil años utilizando las cuevas para sepultar a sus muertos, empezó a apuntalar la techumbre con pilares de piedra labrada en un vano intento por frenar el derrumbe.

El complejo sepulcral del yacimiento de Brochtorff fue utilizado durante unos 1500 años, período que abarcó varias etapas de la evolución de la sociedad y la religión maltesas. En el período Zebbug temprano, entre el



3. "MATRONA", representación de la diosa madre. Este tipo de figurillas se encuentra en muchas culturas mediterráneas de la antigüedad, aunque menos trabajadas que las de Malta. Pero no todas las figuras humanas de Malta corresponden a mujeres.

MEGALITO
CUEVA
SANTUARIO
FOSA COMUN
UMBRAL
PORTICO DE PIEDRA
AREA CENTRAL DEL SANTUARIO
PAREJA DE FIGURAS SENTADAS
CUEVAS
VASIJA DE PIEDRA
HOYOS CON ESQUELETOS SEMIARTICULADOS









Cámaras funerarias subterráneas

El Círculo de Brochtorff delimita un complejo de cuevas que los habitantes de Gozo utilizaron para sus enterramientos entre el 4000 y el 2500 a.C. Los buscadores de tesoros descubrieron el lugar y lo arrasaron, taponándolo, en el siglo pasado, pero en 1987 los autores y sus colegas lo volvieron a encontrar y a excavar. Una fotografía aérea *(izquierda)* muestra el yacimiento tal como aparece hoy. El dibujo *(arriba)* ofrece una reconstrucción parcial del complejo funerario basada en el trabajo reciente. Se distinguen miles de restos humanos, muchos adornados con el pigmento ocre rojo ceremonial, en hoyos excavados en el suelo de la cueva.

4000 y el 3500 a.C., los rituales funerarios eran elementales. Se colocaba el difunto en cámaras colectivas situadas en cuevas o en tumbas excavadas en la roca. Es posible que cada cámara cobijara los miembros de una familia o de una estirpe; en 1988 descubrimos una tumba de ésas en el interior del círculo. Los ritos funerarios incluían la extracción progresiva de los huesos de enterramientos anteriores para dejar sitio a los nuevos; los huesos grandes extraídos se depositaban tal vez en otras partes de la cueva.

Con el muerto se enterraban ofrendas diversas: objetos de cerámica, cuentas y colgantes de hueso y piedra, hachas de piedra, cuchillas de sílex y obsidiana, pendientes de conchas y gargantillas de conchas y abalorios. Los colgantes fabricados en hueso suelen tener unos apéndices que, brotando a modo de yemas, evocan brazos y cabezas. Se esparcía copiosamente ocre rojo sobre las ofrendas y huesos blancos secos del difunto (quizás en un intento simbólico de devolverle a la vida). Custodiando la entrada de una de las cámaras se yergue un pequeño monolito (un menhir) que ostenta una cara rudamente tallada.

Los últimos enterramientos, contemporáneos del gran período tarxieno de construcción de templos, fueron diferentes. Al parecer, se sustituyó el énfasis en los grupos familiares restringidos por un culto más elaborado y ritualizado de la muerte, hipótesis que, en buena parte, se apoya en la construcción megalítica del propio Círculo de Brochtorff. Los constructores cercaron la entrada de la cueva con una pared y orientaron su acceso hacia el este, a través de impresionantes losas verticales. De este modo integraron el yacimiento con el templo Ggantija, distante unos 300 metros y situado en una terraza inferior de la meseta.

En el interior de las cuevas los arquitectos del tarxieno nivelaron las sepulturas anteriores y prepararon una superficie nueva (si bien atestada de huesos) para la instalación de monumentos líticos. Los nichos y las cavernas menores se subdividieron con pares de piedras verticales y toscas paredes, creando así más lugares cerrados para enterramientos. En el centro de la cueva principal levantaron losas megalíticas en semicírculo, en cuyo centro había una enorme vasija tallada en roca. La obra de cantería en torno a la vasija era elegante, y hay pruebas de que contenía figuras de animales y modelos esculpidos. Los constructores no aplicaron ocre rojo con tanta profusión como sus predecesores, y pintaron sólo algunas losas inmediatas.

Se enterraban los cuerpos en los compartimentos que rodeaban este santuario central. Había un sepulcro digno de mención: una cavidad natural abierta en el suelo de la cueva donde se inhumaron cientos de cuerpos. A primera vista, los restos parecían incompletos y en desorden. Nuestro ulterior trabajo demostraría, sin embargo, que los huesos de muchos cuerpos habían sido clasificados y amontonados por tipos: cráneos por un lado, fémures por otro, y así sucesivamente. Este modelo sugiere la desarticulación, durante el ritual mortuorio, de los cuerpos antiguos que se iban a sacar de los compartimentos.

Estamos estudiando los huesos humanos, correspondientes a centenares, si no millares, de personas. A tenor de los primeros resultados, el maltés de la antigüedad era un mediterráneo prototípico: de complexión robusta y talla mediana. Manifiesta ciertos rasgos distintivos; por ejemplo, la fosa digástrica, surco bien desarrollado a ambos lados del cráneo que se encuentra en otras poblaciones. Su salud era, por lo que se desprende, muy buena, sin graves problemas dentarios u otras enfermedades detectables. Se observan las mismas características antropológicas desde los pobladores más remotos del Zebbug hasta la gente del tarxieno tardío, lo que revela escasos cambios, si los hubo, en la composición genética de la comunidad maltesa primitiva. Las modificaciones en sus hábitos y rituales no obedecieron, por tanto, a la inmigración foránea. Se seguirán estudiando los huesos durante los próximos años, en una de las mejores, y posiblemente mayores, muestras de investigación sobre la antigua población mediterránea que se haya jamás emprendido.

Las únicas ofrendas enterradas con estos pobladores del tarxieno (que han sido datados por el método del carbono radiactivo en torno al 2800 a.C.) eran estatuillas de figuras humanas, obesas y esmeradamente modeladas en cerámica; a juzgar por la acumulación de grasa en las nalgas, se trata de mujeres. Su descubrimiento en ese lugar resulta sumamente significativo: señala la primera asociación segura entre las "señoras gordas" y los lugares de enterramiento, pero no con los santuarios ni los altares.

A ras del suelo, en la entrada monumental que desciende hacia el interior de las cavernas subterráneas, había otro hoyo abarrotado de restos humanos. Abundaban los varones, cuyos esqueletos habían sido reordenados después de tomar las partes de algún otro lugar de enterramiento. Casi

ninguna ofrenda funeraria acompañaba los huesos. En los altares que flanqueaban el pavimento megalítico situado al lado del hoyo sepulcral se celebraban los sacrificios y homenajes preliminares antes de que el sacerdote y la afligida comunidad reunida se aventurasen a bajar al interior de las hediondas cuevas de la muerte.

Los descubrimientos más excitantes del yacimiento de Brochtorff, además de los restos humanos en sí mismos, son pequeñas esculturas en piedra que han modificado nuestra opinión sobre el papel del arte en la antigua religión local. Los malteses prehistóricos del período tarxieno invirtieron casi toda su artesanía y oficio en objetos de culto, que eran más que meras ofrendas funerarias. Cerca de la vasija de piedra del santuario megalítico se desenterraron un colador de cerámica y una escultura de piedra. Probablemente el colador se usaba con el recipiente para tamizar los objetos desechables o para rociar líquidos sobre los cuerpos.

La escultura muestra un par de figuras obesas de hermosa talla y pintura sentadas en un lecho intrincadamente cincelado, untado de ocre rojo, con una suerte de riostras en la superficie inferior y diseños curvilíneos en la superior. No podemos discernir si se trata de hombres o mujeres. Visten los faldones plisados, pintados de negro, de las más finas figuras de culto maltesas. La cabeza de una de las figuras luce un corte de pelo en el que destaca una trenza a la espalda. Falta la cabeza de la otra figura. Sostienen objetos en su regazo: una de ellas tiene una persona chiquita vestida (un niño quizá), la otra una copa.

Además de por su fina artesanía, esta escultura sorprende porque durante este período Europa desconoce casi por completo el retrato en grupo de seres humanos; es más, ni siquiera menudean las figuras individuales, que no sean las "matronas". Unos pocos artefactos cuyas características recuerdan a esta escultura se han encontrado en algún otro lugar de la antigua Malta, como los fragmentos de camas talladas y la Señora Durmiente en terracota del hipogeo. No obstante, este descubrimiento es uno de los grupos escultóricos más antiguos y que más han hecho reflexionar sobre la prehistoria europea.

El otro gran hallazgo importante fue un escondite de nueve ídolos tallados en piedra, estrechamente asociados también con la vasija de piedra del santuario central. Los objetos debieron guardarse envueltos al principio en una bolsa o una caja; cuando se desenterraron en 1991, estaban apilados, después de haber caído desde las estructuras que rodeaban el cuenco. Seis de los objetos representan figuras humanas: formas triangulares y planas unidas a tallas de cabezas humanas, cuyo acabado va desde simples esbozos hasta ídolos de culto diestramente ejecutados. Dos de las figurillas mejor terminadas portan faldas plegadas y cinturones, y una se corona con una diadema labrada. Las caras de ambas figuras muestran con nitidez ojos, labios y nariz. Una tercera figura, más sencilla, se adorna con que un tocado en capucha exquisitamente esculpido. Dos más presentan su cuerpo plano y pelo recortado. La última de las seis es un esbozo tosco que inicia sólo las líneas que iba a seguir la escultura terminada.

Los tres ídolos restantes de los nueve son pequeños y particulares. Uno tiene una cabeza de cerdo, el segundo una cabeza humana bien tallada en un pedestal fálico y el tercero una cabeza sustentada por dos piernas. Junto a estos objetos había un tarro tarxieno en miniatura lleno de ocre, quizá para untar a los ídolos.

En ningún otro lugar de Malta o del Mediterráneo central se han encontrado objetos parecidos. Lo que no resta expresividad informativa al contexto. Si las figuras asociadas con la muerte en sus cámaras mortuorias son las "matronas", las del santuario central revisten mayor complejidad. No se adivina el rasgo que acentúe la fertilidad femenina en las imágenes del santuario. De hecho, cuando la imaginería admite una interpretación, parece ser masculina y animal. El contexto de su descubrimiento sugiere que los objetos del santuario constituían los elementos empleados por los especialistas del ritual o los sacerdotes; por su lado, el simbolismo trascendía el evocado por la diosa madre.



4. CUENCO DE CERAMICA para guardar el ocre rojo, pigmento con el que se untaban las figuras rituales y los huesos humanos durante los ritos funerarios malteses.

Los descubrimientos sin precedentes realizados en el Círculo de Brochtorff nos han animado a reconsiderar todo el fundamento de los primitivos cultos y religiones de la prehistoria de Malta y Gozo. Como suponían los arqueólogos del pasado, el culto de la fertilidad podría haber sido un componente de la religión prehistórica. Pero los hallazgos recientes indican que sería un error limitarse a un aspecto o período histórico: la religión prehistórica de Malta no era tan sólo un endiosamiento de las matronas.

Durante el período Zebbug, entre el 4000 y el 3500 a.C., el culto se concentró en la provisión de cuevas y tumbas subterráneas como lugares fu-



5. IDOLOS DE PIEDRA que usaron probablemente los sacerdotes en el Círculo de Brochtorff durante el período tarxieno. Las figuraciones de la izquierda, que representan figuras humanas, muestran niveles muy diferentes de detalle y ejecución artística. Los otros tres, que invocan imaginería animal y fálica, son más fantasiosos.

nerarios. Las representaciones exactas de las personas no parecen haber desempeñado un papel destacado en los rituales locales: las figuras más ceñidas a las formas humanas halladas en las tumbas son las caras toscas de los menhires y los curiosos colgantes óseos de los que brotan apéndices parecidos a brazos y cabezas. El ocre rojo era la decoración predominante. Se recurría también a las hachas exóticas de diorita y otros objetos fabricados en pedernal y obsidiana para componer las ofrendas funerarias. En muchos aspectos, los rumbos de los primitivos rituales parecen haber seguido tendencias paralelas en Sicilia, donde se estaban desarrollando contemporáneamente las tumbas excavadas en roca y los sencillos ritos de enterramiento colectivo. El archipiélago maltés de este primer período era todavía relativamente fértil y puede que no estuviera superpoblado.

Medio milenio más tarde, sin embargo, Malta se vio sacudida por grandes cambios. Se dejó sentir, quizás, el efecto de la erosión del suelo y aparecieron otros signos de degradación ambiental; en este entorno, es casi seguro que la demografía comenzara a plantear problemas. Los artefactos —obesas figurillas humanas, representaciones de animales y símbolos fálicos tallados en piedra y hueso, y modelados en arcilla— dan a entender que el pueblo estaba obsesionado con el mundo vivo y su propagación satisfactoria. Malta se convirtió, tal parece, en un mundo aislado bajo una fuerte tensión económica y ambiental, donde las comunidades luchaban por mantener sus anteriores niveles de vida y alimentar a la población. Sin embargo, se importaron menos materiales durante esta época de crisis que en la era más floreciente. La sociedad maltesa prehistórica parece haber dejado que la fijación por la escultura y el arte sustituyera al contacto con el mundo ultrainsular.

Esta debilitante fijación explicaría por qué los templos abundan tanto en un grupo de islas reducido. Se ha propuesto la hipótesis de que fueron construidos por una media docena de clanes o tribus rivales, que competían entre sí por la tierra y el agua. El tamaño colosal de los templos, y las adiciones arquitectónicas tardías que los realzan todavía más, podrían haber sido inspirados por dicho espíritu competitivo. La influencia religiosa y el control social sobre la población podrían haberlo acentuado.

Las actividades rituales alcanzaron verosímilmente su clímax febril en las fases finales del período tarxieno, en torno al 2500 a.C. La sociedad sufría el dominio creciente de una jerarquía religiosa en la que los sacerdotes controlaban gran parte del quehacer del pueblo. Abrumadoras cantidades de tiempo y energía se invirtieron en la construcción de templos, la creación artística y la celebración de banquetes rituales. El difunto era honrado en los cultos y vinculado con los animales y la obesidad humana. Según parece, se atendió poco la construcción de pueblos o estructuras habitables, así como la creación de bancales de cultivo.

En torno al 2500 a.C., la comunidad de los constructores del templo había dejado de edificar y quizás incluso de usar los monumentos funerarios legados por las generaciones anteriores. En el 2000 a.C., el culto absorbente había desaparecido, sustituido por prácticas religiosas muy diferentes que favorecían los funerales crematorios. Se abandonaron los hipogeos mortuorios, el culto de las "matronas" y el resto de símbolos de la vida y la muerte.

La religión prehistórica de Malta podría haber sido un experimento frustrado del laboratorio mediterráneo. Como muchos fracasos, sin embargo, nos dice más de lo que podría habernos ofrecido su éxito. El fervor religioso extremo de la antigua Malta pone de manifiesto uno de los posibles resultados cuando se somete a las sociedades a grandes presiones. Las próximas campañas y reconstrucciones que se acometan en Malta y otros yacimientos de la cuenca deberían ensanchar nuestro conocimiento de la complejidad y la diversidad de la sociedad prehistórica. En esa esperanza continuamos excavando en el Círculo de Brochtorff.

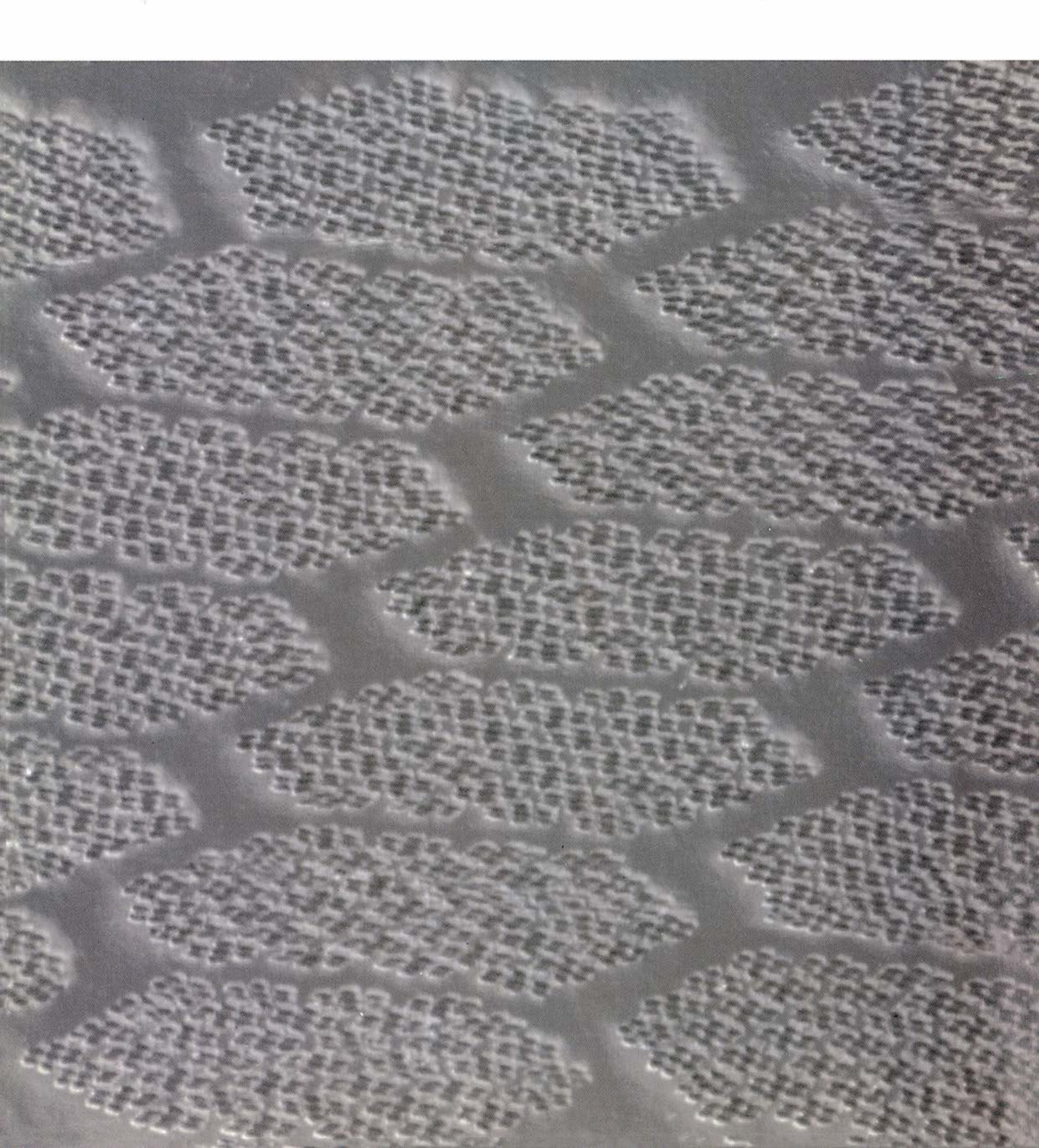
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MONUMENTS IN AN ISLAND SOCIETY: THE MALTESE CONTEXT. A. Bonanno, T. Gouder, C. Malone y S. Stoddart en *World Archaeology*, vol. 22, n.º 2, páginas 190-205; octubre, 1990.

CULT IN AN ISLAND SOCIETY: PREHISTORIC MALTA IN THE TARXIEN PERIOD. S. Stoddart, A. Bonanno, T. Gouder, C. Malone y D. Trump en *Cambridge Archaeological Journal*, vol. 3, n.º 1, páginas 3-19; abril, 1993.

AL CORRIENTE

Philip Yam

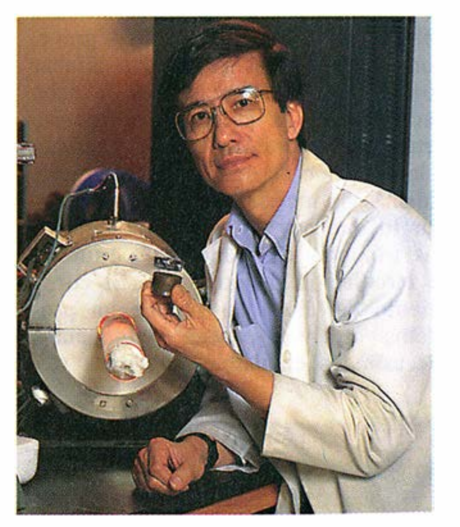


Olvidado ya el pasajero furor, se van cumpliendo las esperanzas que el descubrimiento de los superconductores de alta temperatura crítica suscitó

Ya no es la misma la atmósfera del mundillo de la superconductividad a altas temperaturas. Pasaron la moda, las declaraciones oficiales y las conferencias a alto nivel de las que se excluía, deliberadamente, a los investigadores "extranjeros"; el debate no gira en torno a la competitividad nacional, los trenes de levitación magnética (presuntos vástagos del imán flotante) y los super-superordenadores. Hoy la investigación aborda sólo avances paulatinos y aplicaciones modestas, pero esta actitud podría hacer realidad más deprisa el advenimiento del reino soñado por los que se apuntaron a la última que el ir de frente y a por todas.

El descubrimiento a finales de los años ochenta de estos compuestos cerámicos —el óxido de itrio, bario y cobre (YBCO), y otros emparentados a él que contienen bismuto o talio combinados con óxido de cobre— parecía que iba a expandir enormemente el mercado de los dispositivos basados en la superconductividad. Cuando se enfría por debajo de una temperatura crítica, el superconductor no sólo transmite electricidad sin resistencia, sino que desvía además los campos magnéticos, que en consecuencia no pueden entrar en él. Los superconductores corrientes, fabricados a partir de metales y aleaciones, se han de enfriar, por medio de helio líquido, hasta la frágil temperatura de unos cuatro grados por encima del cero absoluto. Su utilidad, debido al coste (más de quinientas pesetas litro) y rápida ebullición del helio líquido, es limitada. Pero la temperatura crítica de los superconductores cerámicos supera los 90 grados kelvin; para enfriarlos más allá de ese punto basta el nitrógeno líquido, que hierve a 77 grados kelvin; cuesta sólo unas pesetas por litro y, lo que no es menos importante, dura, para una misma carga calorífica, sesenta veces más que el helio líquido.

Los productos hoy disponibles son dispositivos o componentes muy especializados: sensores de campo magnético para fines didácticos, conductores de corriente en sistemas de formación de imagen por resonancia magnética (IRM) y varillas de nivel para el nitrógeno líquido. No se puede decir que estos aparatos exciten la imaginación o revolucionen la sociedad; pero son hitos tangibles en el camino hacia el éxito comercial de los nuevos superconductores. "El progreso habido hasta la fecha ha superado ampliamente las expectativas realistas", dice Thomas R. Schneider, del Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica (EPRI), organización financiada por las compañías eléctricas estadounidenses.



2. GRANDES ESPERANZAS. Paul C. W. Chu, de la Universidad de Houston, hace flotar un trozo de YBCO sobre un imán ordinario. Chu ha comprobado que un óxido de cobre basado en mercurio y sometido a presión superconduce por encima de los 150 grados kelvin.

Schneider escoge sus palabras con intención, y recalca una: "realistas". Con ella se refiere a que existan prototipos, pruebas, contratos y metas a largo plazo. Desde este punto de vista, el progreso ha sido en verdad gratificante, y, según muchos, superior al previsto. Ya se están efectuando demostraciones de componentes de uso en comunicaciones por ondas micrométricas y rastreo militar, y todo está a punto para que empiece su producción. Los cables se van haciendo más largos, cada vez pueden transportar más corriente y se han construido ya con ellos dispositivos que prueban la viabilidad técnica de las aplicaciones de potencia.

Contra los granos

El optimismo ante los progresos recientes viene de que, por definición, estos materiales apenas si pueden ser trabajados. Al fin y al cabo son cerámicas. ¿Cómo se da forma a hilos o circuitos a partir de una sustancia tan frágil como la tiza? No plantea menos dificultades que el material adolezca de "uniones débiles". Los superconductores de alta temperatura se componen de granos. La electricidad circula sin problemas dentro de ellos, pero le cuesta a veces pasar de uno al siguiente porque no siempre están correctamente unidos entre sí. Pueden ser grandes los huecos que los separan, y cualquier desalineación —basta con que sea sólo de cinco grados— impide que la corriente fluya sin resistencia. Las uniones débiles llegan a reducir la cantidad de corriente transportada en dos órdenes de magnitud.

El de los campos magnéticos externos era un problema aún más imponente. En muchos de los usos a gran escala que se imaginaban —motores, transformadores y dispositivos de levitación—, la presencia de campos magnéticos sería parte integral del sistema o consecuencia inevitable de su funcionamiento. Cualquiera que sea su procedencia, un campo externo suficientemente intenso penetrará en el superconductor en forma de haces

1. SECCION TRANSVERSAL LATERAL de un cable superconductor de alta temperatura, aumentada 300 veces. El hilo, fabricado por American Superconductor, se compone de filamentos superconductores, cada uno de cuatro micrometros de espesor, empaquetados en configuraciones hexagonales. Así puede doblarse y resistir el agrietamiento un cable que, de otro modo, se caracterizaría por su fragilidad quebradiza.

discretos de líneas de flujo, o vórtices. Si el superconductor está frío, los vórtices permanecerán anclados en su sitio y formarán una estructura reticular; la corriente circulará alrededor de ellos sin mucha dificultad. A temperaturas más templadas, sin embargo, los haces de flujo magnético empezarán a "desplazarse": la red de vórtices se "fundirá" cuando se alcance cierta temperatura, y los vórtices se moverán por el material y bloquearán la circulación de electricidad (*véase* "Resistencia de los superconductores de alta temperatura crítica", por David J. Bishop, Peter L. Gammel y David A. Huse; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1993). Aún peor: la transición de fusión está, para todos los óxidos de cobre, por debajo de la temperatura del nitrógeno líquido.

La combinación de uniones débiles y movimientos de vórtices entorpece la circulación de corriente en los nuevos superconductores. A menos que se encontrase una forma de superar esos problemas, había pocos motivos para sustituir a los superconductores de baja temperatura ya existentes, que no los sufren. Son, en su mayoría, aleaciones de niobio, que pueden transportar una corriente 100 veces mayor que el cobre ordinario: 100.000 ampères por centímetro cuadrado en un campo magnético intenso, de varias teslas (para hacerse una idea de qué significa este valor, el campo magnético terrestre viene a ser de 0,1 militeslas, y el generado por los dispositivos IMR, de menos de dos teslas). Las cuestiones que tocan a los fundamentos, y el movimiento de los vórtices es una de ellas, también son importantes para quienes andan tras aplicaciones prácticas, dice David J. Bishop, de los laboratorios Bell de AT&T, uno de los descubridores del fenómeno de los vórtices. "Hacen que les sea más difícil conseguir lo que buscan." Así era... y así es. En 1989 ni siquiera habían pasado tres años del descubrimiento de los superconductores de alta temperatura, y ya no parecían tan "súper". Los medios de comunicación insinuaban que su empleo a gran escala quizá no pasase de ser una fantasía, y el pesimismo cundió entre los especialistas.

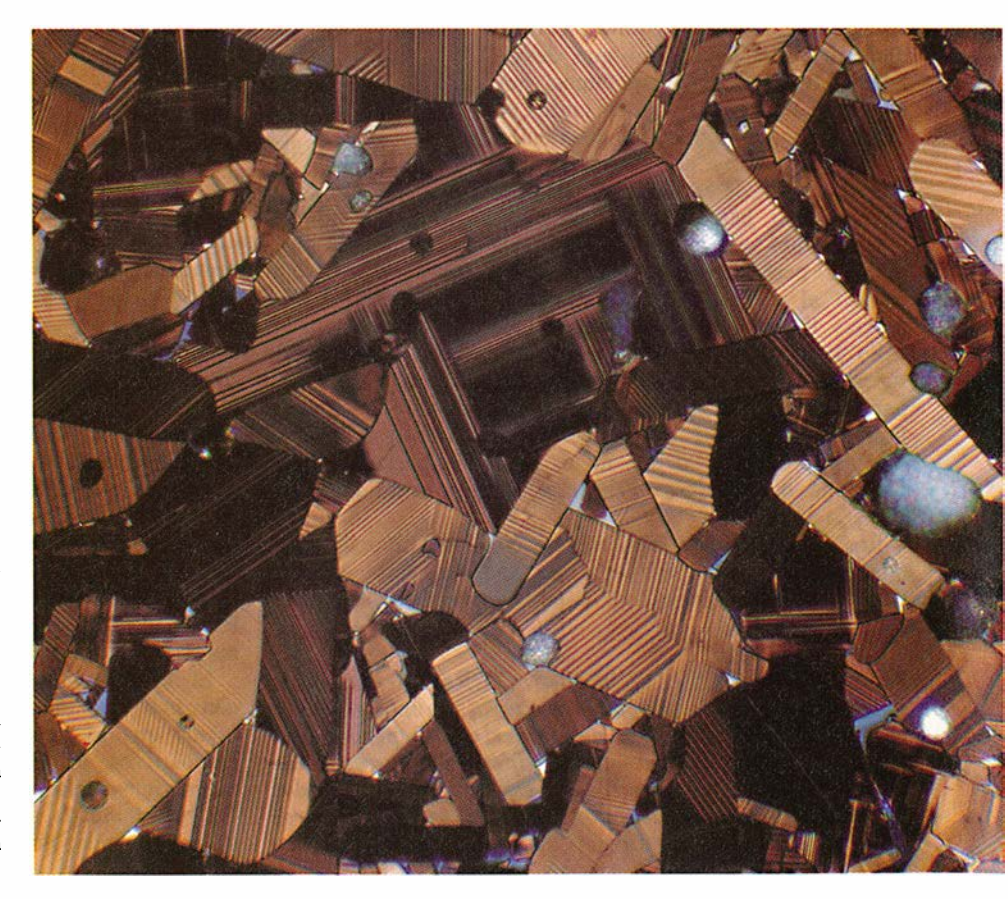
Películas de cerámica

Como guerrillas que se enfrentan a una fuerza superior, hubo, entre los que seguían esta línea de trabajo, quienes decidieron rodear el obstáculo en lugar de abordarlo frontalmente. Sabían que los problemas de las uniones débiles y el corrimiento del flujo ("flux creep") dificultaban las aplicaciones en materiales gruesos —es decir, en cables para motores, bobinas o líneas de transmisión—. También sabían que los inconvenientes pesaban mucho menos en las aplicaciones de película delgada —en concreto, en el área de la electrónica—.

En vez de sacar de materiales frágiles hilos flexibles, quienes elaboraban aplicaciones electrónicas intentaron formar superficies con espesor de micras y grabar configuraciones de circuitos sobre ellas. Las uniones débiles no son una dificultad grave, porque los granos se pueden alinear con el sustrato sobre el que se debe hacer crecer la película (el soporte actúa de soporte mecánico y afecta a la dirección de desarrollo del grano). Además, la muestra entera es pequeña, por lo que hay, en comparación, pocas fronteras de grano que perturben la circulación de corriente. El corrimiento del flujo no supone un problema: rara vez se usan componentes electrónicos en ambientes donde reinen campos magnéticos intensos. Las películas delgadas de YBCO pueden conducir corrientes de cinco millones de ampères por centímetro cuadrado a 77 grados kelvin.

Debido a que las uniones débiles y el flujo magnético las afectan menos, se pronosticó que pronto habría en el mercado componentes hechos de estas películas delgadas. Los expertos predecían su aplicación en sistemas celulares de comunicación y en sensores biomédicos. Para estos usos, tendrían mucho menos tamaño y manejarían mucha más información que los elementos existentes.

No han sido estos expertos los primeros con bola de cristal empañada. La fabricación de películas delgadas grandes y de buena calidad resultó ser la principal barrera para las aplicaciones electrónicas. "Nos sorprendió descubrir cuán difícil era trabajar con estos materiales", afirma John M. Rowell, de Conductus, empresa especializada en aplicaciones de película delgada en Sunnyvale. "Se carecía de conocimientos básicos sobre los materiales de óxidos." Las propiedades superconductoras dependen mucho de la estructura cristalina. A lo largo de la elaboración aparecen a menudo las fases aislantes del material. La elección del sustrato era también difícil. Durante la fabricación "mordíamos el sustrato o se nos



3. ESTRUCTURA GRANULAR desordenada del superconductor YBCO, a la que se debe el problema de las uniones débiles. La mala alineación, así como cualquier impureza que pueda existir en las fronteras de grano, dificulta seriamente la circulación de la corriente eléctrica de un grano a otro.

metía en el superconductor", confiesa James H. Long, de Superconductor Technologies Incorporated (STI), de Santa Bárbara. Los fabricantes de películas han dominado su arte por el método de prueba y error, y pueden ahora crear películas válidas comercialmente con diámetros de hasta unos cuantos centímetros.

El superconductor elegido para la mayoría de las aplicaciones en forma de película es el YBCO. Una película de YBCO transporta más corriente que los miembros de la familia del bismuto. El número pequeño de elementos en el YBCO hace que este material sea más sencillo de producir que las películas basadas en talio. Los fabricantes de películas delgadas depositan el superconductor de dos maneras, principalmente: la ablación por láser y la pulverización catódica ("sputtering"). En la primera, un láser excímero de pulsos vaporiza trozos del superconductor, que seguidamente cristalizan sobre el sustrato; en la pulverización, un plasma evapora sobre un sustrato el superconductor.

Las empresas STI y DuPont han sacado hace poco filtros, resonadores y líneas de retardo que funcionan a frecuencias de ondas micrométricas y radio. Aunque no aparezcan en los catálogos de electrónica de consumo, sí son elementos corrientes en instrumentos militares y sistemas de comunicaciones. Los dispositivos hechos con materiales superconductores proporcionan mayor intensidad de señal y permiten un mejor tratamiento de ésta, y a la vez evitan el tamaño excesivo y las pérdidas eléctricas desmesuradas. Así, STI fabricó una línea de retardo de las que utilizan los militares para interpretar las señales de análisis de un objetivo. El componente mide unos 25 centímetros cuadrados, reducción notable respecto a los 21 metros de cable coaxial de acero inoxidable que se necesitaban normalmente para dar una prestación similar, según STI.

Varias compañías han creado también interconexiones, puentes sin resistencia que unen un componente con otro. Las interconexiones podrían ser útiles en módulos de multipastillas. Estos densos paquetes de varias pastillas de ordenador constituyen una alternativa a las configuraciones cada vez más finas que se graban en las obleas de silicio.

Para los empresarios que persiguen la comercialización en masa, el objetivo obvio es el mercado de las telecomunicaciones. Pueden entrar en él por medio de los filtros con que las estaciones básicas eliminan el ruido de radiofrecuencias que invade el medio de la comunicación celular. Los filtros de materiales superconductores mantendrían mejor la integridad de las llamadas en telefonía móvil que los corrientes, y con ellos cada célula podría manejar más canales. Los laboratorios Bell de AT&T, Illinois Superconductor y otras compañías trabajan en estos filtros celulares.

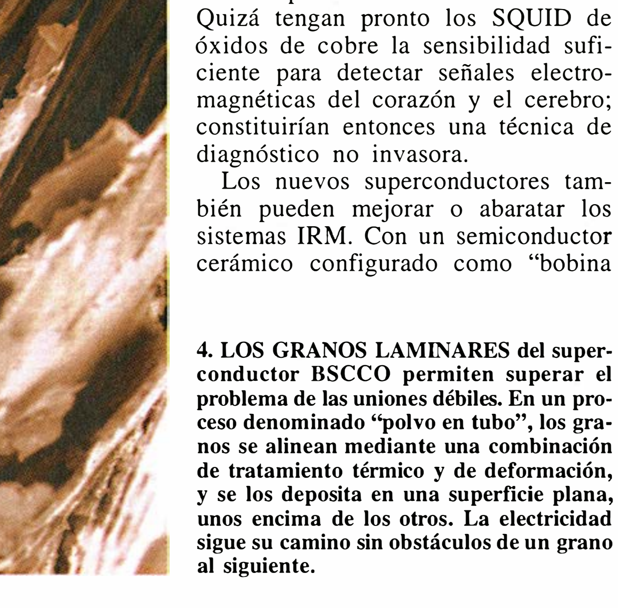
Calamares electrónicos

Otra buena oportunidad es la demanda de detectores magnéticos de gran sensibilidad. Con un superconductor de alta temperatura podemos crear un SQUID (*superconducting quantum interference device*, dispositivo superconductor de interferencia cuántica). Un *squid* es, en inglés, un calamar; un SQUID, una espira superconductora grabada en silicio. La espira contiene una o dos uniones que son sólo débilmente superconductoras —uniones de Josephson—. La corriente de electrones que pasan por efecto túnel a través de ellas es extremadamente sensible a los campos magnéticos. Un cambio en la corriente se manifiesta en un cambio medible en el voltaje de la unión. La construcción de estos dispositivos tropieza con dificultades que sólo ahora van superándose.

Conductus vende un magnetómetro denominado Mr. SQUID, destinado principalmente a fines educativos. Las versiones mejoradas deberían permitir a los ingenieros descubrir, con un coste pequeño, defectos en una estructura mecánica sin dañarla ni tocarla; la razón es que los defectos producen en las estructuras metálicas señales magnéticas de "identificación" que los SQUID detectan. Debido a que las rocas conducen débilmente la electricidad y el aceite es aislante, los geólogos podrían contar con estos dispositivos para las prospecciones petrolíferas. Pero el premio gordo para las pequeñas compañías es el mercado clínico. Quizá tengan pronto los SQUID de óxidos de cobre la sensibilidad suficiente para detectar señales electromagnéticas del corazón y el cerebro; constituirían entonces una técnica de diagnóstico no invasora.

Los nuevos superconductores también pueden mejorar o abaratar los sistemas IRM. Con un semiconductor cerámico configurado como "bobina





4. LOS GRANOS LAMINARES del superconductor BSCCO permiten superar el problema de las uniones débiles. En un proceso denominado "polvo en tubo", los granos se alinean mediante una combinación de tratamiento térmico y de deformación, y se los deposita en una superficie plana, unos encima de los otros. La electricidad sigue su camino sin obstáculos de un grano al siguiente.

receptora" cabría mejorar la relación señal-ruido de muchos instrumentos sin que hubiese que recurrir para ello a grandes, y más caros, imanes.

¿Y los ordenadores superconductores? Ha habido algún progreso, pero no es probable que aparezcan productos de electrónica digital hasta el siglo que viene. Se han diseñado interruptores electrónicos, a partir de uniones de Josephson, que sólo consumen unos pocos microwatts al activarse y desactivarse en unas pocas billonésimas de segundo. Las uniones consumen sólo una milésima parte de la potencia que gastan los dispositivos semiconductores y son diez veces más rápidas. Se han hecho también demostraciones de los transistores de circulación de flujo, alternativa a las uniones de Josephson. Su principio de funcionamiento convierte en virtud el defecto fatal de estos materiales: el movimiento de los vórtices magnéticos. El movimiento de las líneas de flujo genera voltajes que una puerta modula para realizar funciones lógicas.

Una tercera clase de conmutador procede de un elemento básico de la electrónica moderna: el transistor de efecto campo. En éste, un campo eléctrico externo cambia el número de portadores de carga de un semiconductor. Sólo unos pocos investigadores, sin embargo, han logrado poner en funcionamiento transistores superconductores de efecto campo, entre ellos Xiaoxing Xi, del Instituto Nacional de Pesos y Medidas de los Estados Unidos, y sus colegas de la Universidad de Maryland.

Los SQUID y las ondas micrométricas son las aplicaciones cuya llegada a mercados sustanciosos está más cercana; en cambio, predice Lauder, de DuPont, "pasarán diez años antes de que se vea una realización digital". Se ha comprobado que no son tareas fáciles ni la fabricación de películas multicapa de alta calidad, ni la grabación, reproducible y barata, de configuraciones de circuitos en ellas. "Aunque las pruebas digitales son prometedoras, están por aclarar algunas cuestiones relativas a la arquitectura de circuitos", reconoce Richard W. Ralston, del Consorcio para la Electrónica Superconductora (CSE). Esta organización, fundada en 1990, asocia a dos empresas que han sido, tradicionalmente, rivales, IBM y AT&T, con el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), el laboratorio Lincoln de éste, varias compañías pequeñas y otras instituciones académicas; su objetivo es acelerar la comercialización de los nuevos materiales.

Tirar un cable

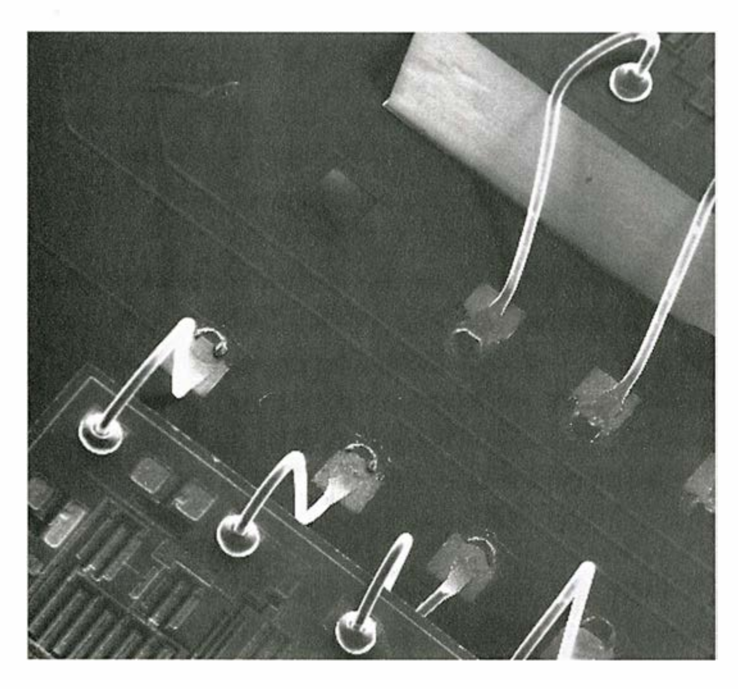
El éxito de las películas delgadas ha puesto varios mercados al alcance de los superconductores de óxido de cobre. Por su parte, los investigadores que se las ven con los materiales gruesos han empezado a disfrutar también de cierto éxito técnico. Una medida de su progreso es la producción de cables cada vez más largos, flexibles y capaces de resistir la penetración de las líneas de flujo.

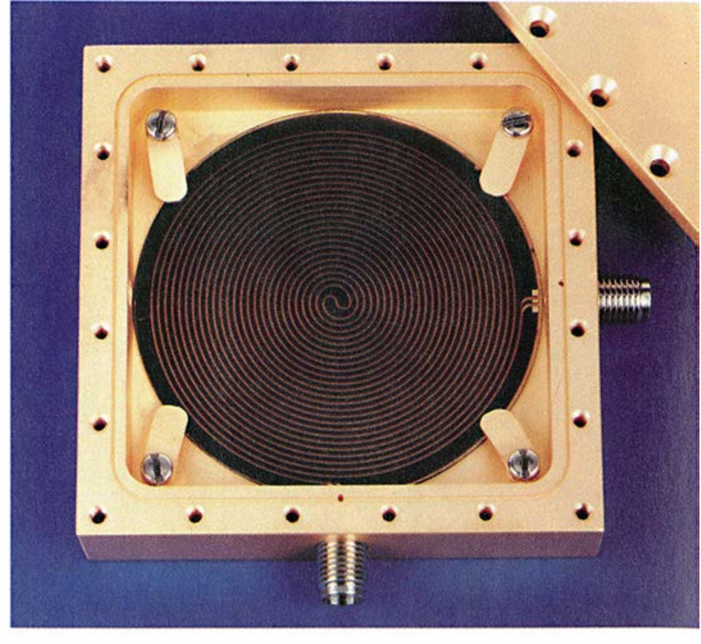
Desde su fundación en 1987, American Superconductor ha competido fuertemente con Sumitomo Electric Industries, empresa japonesa, e Intermagnetics General, de Guilderland, en la producción de un cable superconductor flexible, más largo y mejor. La compañía de Massachusetts va a la cabeza: bobina regularmente 300 metros de cable dúctil, capaz de transportar más de 10.000 ampères por centímetro cuadrado sin campo aplicado y a 77 grados kelvin. La compañía planea romper la marca del kilómetro en abril de 1994. Con este logro se podría tener en cuenta a los cables de óxidos de cobre para su uso en líneas de transmisión, que deben aguantar densidades de energía de al menos 20.000 ampères por centímetro cuadrado a lo largo de kilómetros.

El pasado año American Superconductor hizo con sus cables bobinas para Reliance Electric, de Cleveland, que construyó con ellas un motor de dos caballos (potencia suficiente para mover el ventilador de un ordenador personal), y acaba de preparar un sónar para la Marina de los Estados Unidos. Se quiere que el aparato cubra un intervalo de frecuencias inaccesible al sónar tradicional.

El problema de las uniones débiles se ha resuelto con el descubrimiento de un compuesto de óxido de bismuto, estroncio, calcio y cobre, o BSCCO. "El paso decisivo fue el material de bismuto, gracia al cual podemos alinear los granos de manera que la corriente circule de un grano al siguiente", dice Roger B. Poeppel, del Laboratorio Nacional de Argonne.

Al igual que otras compañías y laboratorios, American Superconductor fabrica el hilo de BSCCO con el método de polvo en tubo, técnica desarrollada en 1989 por Vacuumchmelze en Alemania. Se llena un tubo de plata con un polvo precur-





sor, y se deforma aquél —por extrusión, laminado o presión— hasta convertirlo en un cable (o una cinta si la sección transversal es rectangular); seguidamente, se calienta el tubo para transformar el polvo precursor en BSCCO. El cable resultante queda protegido por la funda de plata, que sirve también como otro camino para la corriente en caso de que se pierda la superconductividad. Los cables también se pueden doblar, porque están hechos de miles de hilos aún más finos.

Para agrupar estrechamente los filamentos, American Superconductor fabrica un hilo, lo lía con otros y hornea el conjunto. Debido a que los materiales compuestos ("composites") son por naturaleza más fuertes que un material puro simple, el cable resiste la tensión mecánica y el agrietamiento aun después de muchos ciclos de enfriamiento y calentamiento.

Aunque estos cables BSCCO de filamentos múltiples han superado las dificultades relativas a las uniones débiles y la flexibilidad, el movimiento de vórtices magnéticos continúa causando problemas. Con la fórmula BSCCO utilizada en los hilos, que se convierte en superconductora a 110 grados kelvin, hay que enfriar hasta unos 25 grados kelvin para mantener fijos los vórtices magnéticos. En aplicaciones que requieran una exposición a campos magnéticos intensos, se han de enfriar los hilos de BSCCO con unos refrigeradores de altas prestaciones, los crioenfriadores, que son más caros que el nitrógeno líquido.

Como quiera que los compuestos BSCCO fijan tan débilmente los vórtices magnéticos, se ha investigado cómo fabricar cables a partir de óxido de talio, bario, calcio y cobre, o TBCCO. Los materiales TBCCO son superiores en este aspecto: en ellos se puede congelar el flujo a temperaturas cercanas a la de licuefacción del nitrógeno. Además, las temperaturas de transición de las fórmulas TBCCO están entre las más altas de los óxidos de cobre. Dos variedades se vuelven superconductoras por encima de los 120 grados kelvin.

A diferencia de los compuestos BSCCO, cuyos granos son una especie de láminas, y así depositables en planos, los compuestos TBCCO se componen de granos aproximadamente esféricos. Esta geometría no se presta a las técnicas de fabricación que producen hilos de BSCCO. Empacar polvo de TBCCO en un tubo sería como envolver piedras con una hoja de aluminio, explica John A. DeLuca, del Centro de Investigación y Desarrollo de General Electric en Schenectady. "Las piedras pequeñas se saldrían."

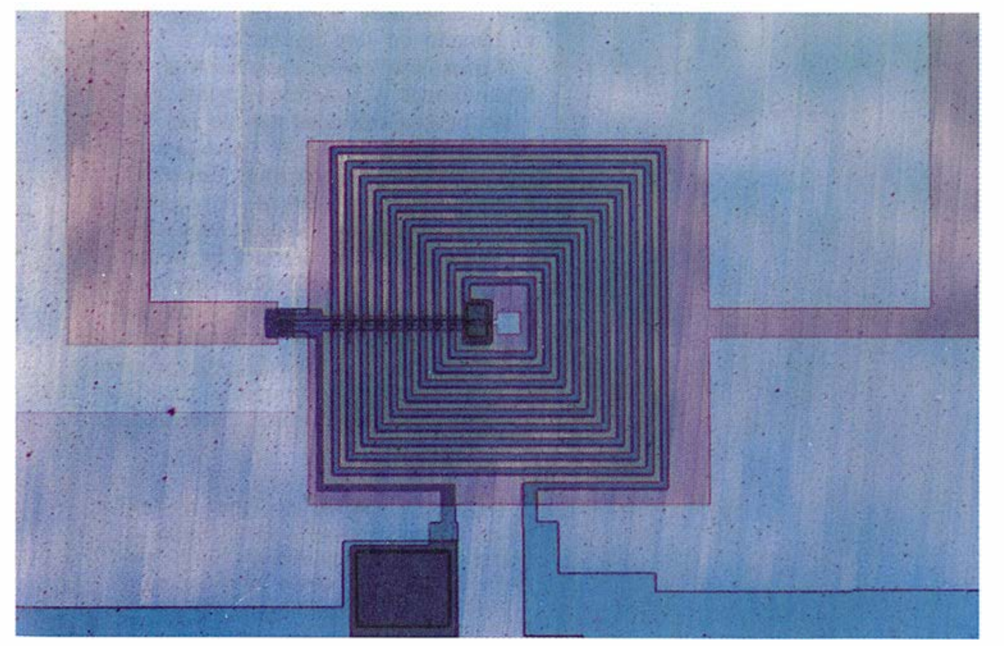
Se ha tomado un método alternativo, de empleo en películas delgadas: depositar TBCCO sobre un sustrato. No es todavía útil comercialmente, pero con él se están produciendo materiales que consiguen fijar el flujo magnético y mantener una alta densidad de corriente.

Una práctica de este estilo es la que va naciendo de la colaboración entre DeLuca y el Laboratorio Nacional de Oak Ridge. Se rocía una solución de bario, calcio, cobre y oxígeno sobre un sustrato inerte de circona estabilizada con óxido de itrio. La muestra se calienta a continuación en un vapor rico en talio, y con ello se forma entonces una película de tres a cuatro micrometros de espesor. Este método de "película gruesa" produce colonias de granos alineados. En un campo nulo a 77 grados kelvin, las películas transportan hasta 104.000 ampères por centímetro cuadrado. La película ha soportado una densidad de corriente de más de 10.000 ampères por centímetro cuadrado en un campo magnético de dos teslas.

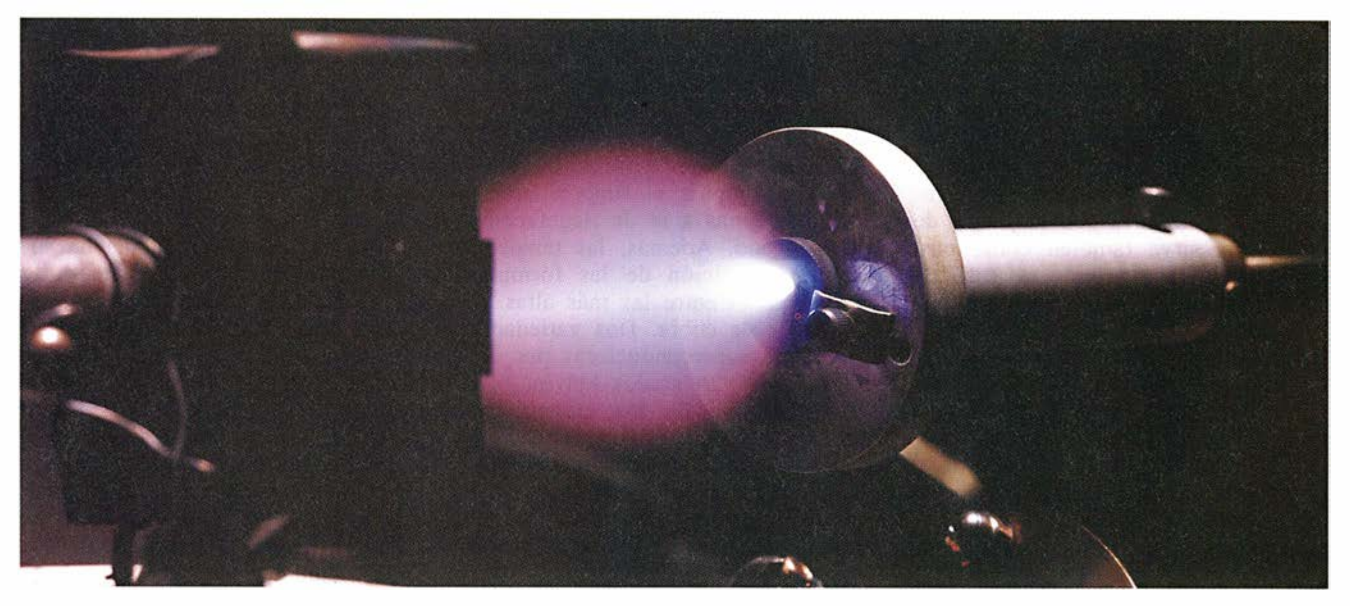
También se estudia la ablación por láser en cuanto método para depositar TBCCO. El equipo de Richard E. Russo, del Laboratorio Lawrence en Berkeley, ha conseguido la máxima densidad crítica de corriente en muestras abultadas de talio hasta la fecha: 600.000 ampères por centímetro cuadrado a 77 grados kelvin.

Flujos flojos y fijos

Pero si se quiere sacar el máximo partido de los superconductores, es muy posible que haya que introducir deliberadamente sujeciones de flujo magnético, como se hace en los materiales de baja temperatura. Las sujeciones del flujo magnético son defectos de un sólido, que tienen tamaño y forma particulares. Los vórtices magnéticos tienden a asentarse en ellos, de la misma manera que las canicas se alojan en depresiones del suelo. Las mejores sujeciones son aquellas cuyo tamaño coincide con la longitud de coherencia de la sustancia. La longitud de coherencia guarda relación con la separación entre los electrones superconductores. En un superconductor de alta temperatura, la longitud de coherencia es muy corta, normalmente de uno a tres nanómetros (lo que viene a ser 30 veces el diámetro de un átomo de hidrógeno); en los de baja temperatura es mucho mayor, de unos 5 a 30 nanómetros.



5. ENTRE LOS DISPOSITIVOS electrónicos hechos de óxido de cobre figuran interconexiones de 20 micrometros de anchura (*las cuatro líneas grabadas que cruzan diagonalmente la imagen*) que discurren entre uniones de hilo de oro conectadas a las pastillas de silicio (*izquierda*); una línea de retardo, utilizada en sistemas electrónicos de ondas micrométricas para demorar las señales unos pocos nanosegundos (*centro*); y un magnetómetro SQUID (*derecha*), circuito integrado que se compone de una pila de capas superconductoras y aislantes. El SQUID propiamente dicho es la capa de color morado claro; las múltiples vueltas sobre él sirven para amplificar el campo magnético que se ha de detectar.



6. LA ABLACION POR LASER deposita películas delgadas de superconductor. El penacho luminoso aparece cuando un pulso de láser ultravioleta (*no visible*) incide sobre una muestra del superconductor montada sobre el soporte de la derecha, donde surge el penacho. El pulso vaporiza parte de la muestra, que se recoge en un sustrato caliente (*en el recipiente*).

Se están siguiendo varios métodos diferentes. El habitual es la irradiación con partículas, el bombardeo de la muestra con iones, neutrones o electrones de gran energía. Estas técnicas de impacto crean lugares de sujeción desplazando en el material los átomos ligeramente. La irradiación con iones pesados produce, además, defectos de columna, que actúan como manguitos que sujetan los vórtices.

Esta técnica tiene un grave inconveniente: para emplearla necesitamos un acelerador de partículas. Quizá se puedan introducir defectos o crear fallos cristalinos durante la elaboración del material. También se estudia cómo sujetar el flujo sin que haya que introducir defectos. Esta técnica, de "sujeción intrínseca", emparedaría los vórtices entre capas de óxido de cobre.

¿Cabe esperar que continúe el progreso en la aplicación de los materiales gruesos? Los sistemas superconductores de almacenamiento de energía magnética (SMES) serán de los primeros dispositivos que estén listos. Para almacenar energía, las bobinas SMES se cargan con corriente continua en circulación. Como no hay resistencia en el hilo, la corriente podría, en teoría, circular sin cesar. Una compañía eléctrica extraería energía cuando la necesitase —por ejemplo, durante un corte de energía o una hora punta de demanda—, o, lo que es más importante, se amortiguarían las oscilaciones de energía que dañan los generadores. La empresa Bechtel está construyendo, con superconductores al uso, un prototipo de 20 megawatts del tamaño de un campo de fútbol. Los materiales de alta temperatura acortarán muchísimo el tamaño de una unidad así.

Varios proyectos cooperativos de instituciones y empresas tienen previsto probar componentes de los llamados "limitadores de fallos en la corriente" en los próximos dos años. Estos limitadores derivan, para evitar daños a líneas y subestaciones, las sobretensiones. Hoy en día la protección contra éstas se realiza por medio de fusibles y disyuntores, y hay que contar con personal de mantenimiento. Southern California Edison calcula que podría diferir mejoras y utilizar fusibles más baratos, ahorrando



7. EXTRACCION de un cable BSCCO de un termo ("dewar") de nitrógeno líquido para su comprobación. En la mayoría de las aplicaciones imaginadas, se utilizarán crioenfriadores en lugar de nitrógeno líquido.

más de mil millones de pesetas anuales en su red energética. Se evalúa que en todos los Estados Unidos el ahorro sería de cerca de 15.000 millones de pesetas anuales.

Las cerámicas superconductoras podrían mejorar el rendimiento de la propia transmisión de energía, quizás hacia el año 2000. Una línea superconductora de transmisión transportaría de tres a cinco veces más electricidad que una línea de cobre. Las líneas subterráneas existentes utilizan cable de cobre sumergido en aceite, que ayuda a enfriar el cable y satura el aislamiento para que el medio sea el que la conducción necesita. "La sustitución de aceite por nitrógeno líquido no plantea el menor problema", dice Gregory J. Yurek, presidente de American Superconductor. El prototipo de cable de transmisión elaborado por American Superconductor ha transportado 1100 ampères por toda su longitud, aproximadamente la mitad de lo que el EPRI piensa que se necesita en el uso comercial.

Pero obstáculos no faltan. Uno de ellos es el enfriamiento de los materiales cerámicos. Para mantener alta la densidad de corriente en el superconductor, la mayoría de las aplicaciones contarán con refrigeración mecánica, mediante crioenfriadores, en vez de nitrógeno líquido. La utilización de crioenfriadores, que enfrían hasta 20 grados kelvin, es más cara que el uso del nitrógeno líquido, pero más barata que el empleo de helio. Otra pega es la madurez de los métodos rivales. Es posible, por ejemplo, que la electrónica digital superconductora no salga nunca del laboratorio. La tecnología del silicio ha resultado ser excelente.

Cuidado con las eles

La industria confía en el futuro económico de la superconducción. La Cumbre Internacional de la Industria de la Superconductividad (ISIS), donde participan grupos industriales de Estados Unidos, Japón y Europa, ha publicado un informe según el cual el mercado de los superconductores, hoy de unos 200.000 millones de pesetas, crecerá hasta un billón o billón y cuarto de pesetas en el año 2000, y 20 o 30 billones en el 2020.

Otros no lo ven tan claro y creen que la rentabilidad está aún en el alero. Los números de ISIS incluyen previsiones de ventas de equipo auxiliar, como, por ejemplo, los ordenadores que se necesitarían para procesar la información de los sensores superconductores. "Cuídate de las expectativas con forma de ele", advierte Bishop, de los laboratorios Bell.

De todas formas, el que los números de ISIS fueran manifiestamente exagerados no descartaría que surgiesen varios mercados específicos. El CSE ha hecho su propio análisis. William J. Gallagher, que dirige la participación de IBM en el CSE, refiere que varios mercados específicos, cuyo monto combinado equivale al del mercado actual de los sistemas IRM, se expandirán a lo largo de este decenio.

El avance dependerá de que se hallen superconductores con temperaturas críticas superiores. De esa manera podrían utilizarse refrigerantes menos costosos (el freón o el hielo seco); o, por lo menos, sería mayor el margen de seguridad con que se contaría para mantener la superconducción. "No hay ninguna razón teórica o experimental por la que deba haber una temperatura crítica máxima", afirman algunos. Los nuevos compuestos de óxido de mercurio, bario, calcio y cobre descubiertos el pasado mes de marzo abundan en esta esperanza. Una variedad superconduce a la temperatura récord de 133 grados kelvin; sometido el material a presión, su temperatura crítica ha alcanzado los 153 kelvin, que se puede conseguir con freón. Los primeros datos acerca de los superconductores basados en mercurio indican que fijan mejor el flujo que las familias del bismuto o el talio. Pero, como al YBCO, las uniones débiles los afectan mucho.

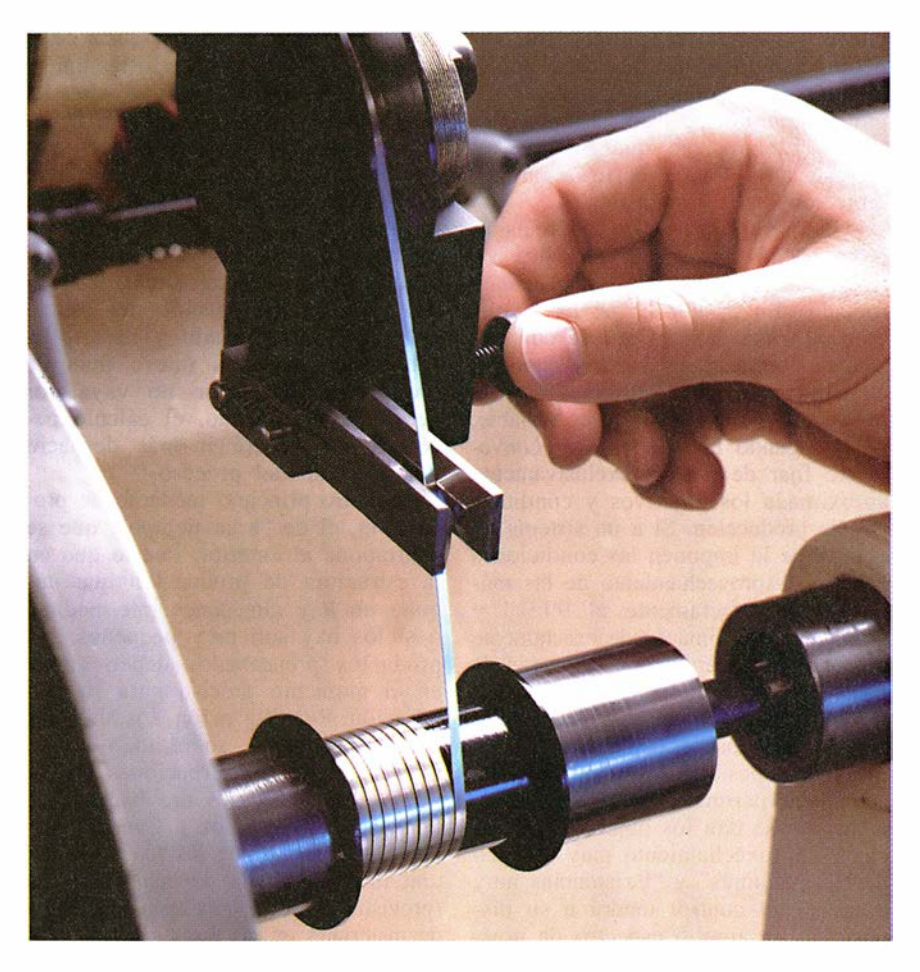
A pesar de las dificultades técnicas y de la ardua financiación, quizá la historia se ponga de parte de los superconductores de alta temperatura. "Es demasiado pronto", observa Schneider, de EPRI. "El transistor se inventó en 1948 y no se utilizó en los receptores de radio hasta 12 o 15 años después." El retraso en aplicar el láser fue de ese orden también.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTIVITY. Número especial de *Physics Today*, volumen 44, n.º 6; junio de 1991.

ENERGY APPLICATIONS OF HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS: A PROGRESS REPORT. Electric Power Research Institute, 1992.

SUPERCONDUCTIVITY: 5 YEARS'S PROGRESS. Número especial de *Logos: Argonne National Laboratory*, volumen 10, n.º 1; otoño de 1992.



8. LA FLEXIBILIDAD DE LOS CABLES superconductores de alta temperatura es tanta ahora que se pueden devanar en bobinas para hacer con ellas imanes.

Ciencia y empresa

Control borroso

Dirección flexible de la producción

En la industria europea se ha producido un cambio de mentalidad a la organización, motivado por una presión renovada de la competencia y por éxitos de la industria japonesa. Las nueve ideas toman en consideración tanto las experiencias japonesas como las capacidades y tradiciones europeas; aquí sólo pueden ser esbozadas de forma incompleta con las expresiones "descentralización" y "paralelización de la marcha del proceso". La dirección computarizada de la fabricación adquiere así perspectivas y cometidos nuevos.

Tal y como se hacía hasta ahora, el control de la marcha de una planta de producción mediante un programa informático funcionaba bien sólo cuando todas las condiciones previamente definidas se cumplían con exactitud. Pero, si las cosas no van del todo como debieran, una persona gracias a su capacidad pragmática, puede a menudo reaccionar con superior habilidad. De ahí que deban sustituirse los controles complejos, rígidos, hiperprecisos, por sistemas flexibles y claros, lo que justifica el recurso a la lógica borrosa para la dirección de la producción.

¿Qué sentido tiene la imprecisión propia de los métodos de la lógica borrosa en un proceso fabril exactamente reglado? En primer lugar: hay datos esenciales del proceso que se conocen sólo de forma imprecisa. Por ejemplo, el tiempo que lleva una etapa de elaboración o si un transporte es variable.

En segundo lugar puede ser conveniente fijar de manera exclusivamente aproximada los objetivos y condiciones de producción. Si a un sistema de control se le imponen las condiciones precisas "Aprovechamiento de las máquinas de exactamente el 99 %" y "Contenido de almacén de exactamente dos piezas", deberán dársele la serie de pasos de producción y otras magnitudes de suerte tal que esas exigencias rigurosas puedan satisfacerse. Quizás esto sea imposible, sobre todo cuando acontecen perturbaciones. Si, por el contrario, se dan los objetivos imprecisos "Aprovechamiento muy elevado de las máquinas" y "Existencias muy escasas", el control tendrá a su disposición un amplio espectro de posibilidades de acción, gracias a lo cual podrá hallar lo mejor o lo óptimo, consideradas las circunstancias.

En tercer lugar, un sistema borroso puede dar a las experiencias de expertos humanos —de imprecisa formulación, en lenguaje ordinario— una forma accesible para un ordenador.

En cuarto lugar, la imprecisión sirve para la reducción de información. Cuando debe tomar decisiones, el jefe de taller puede encontrar insuperable la complejidad de un proceso. La reducción a lo esencial puede convertir aquí un gran número de desorientadoras indicaciones aisladas en un modelo que configure un bosquejo general fácil de entender. Ante la pregunta de qué es esencial y qué es accidental en cada caso concreto, habrá que recurrir de nuevo a la información (imprecisa) de los expertos humanos.

Por otra parte, la vaguedad simplifica mucho el modelo subyacente al programa de control, y ayuda, con ello, a reducir drásticamente el tiempo de cálculo, lo que reviste capital importancia.

En oposición a la idea centralista del control computarizado de la producción, el principio de "dirección escueta de la producción" dicta que pequeñas unidades, más o menos autónomas, sean las responsables de las decisiones; la razón es que pueden tomar decisiones flexibles y próximas a la realidad gracias a un estrecho acoplamiento retroactivo. El programa, con un intervalo regular (de segundos a media hora, según la características del proceso) recibe información del estado del sistema gestionado y desarrolla, sobre esta base, un nuevo plan de producción. Para que no vaya por detrás de la realidad, el cálculo necesario no deberá ir más despacio que el ritmo del proceso.

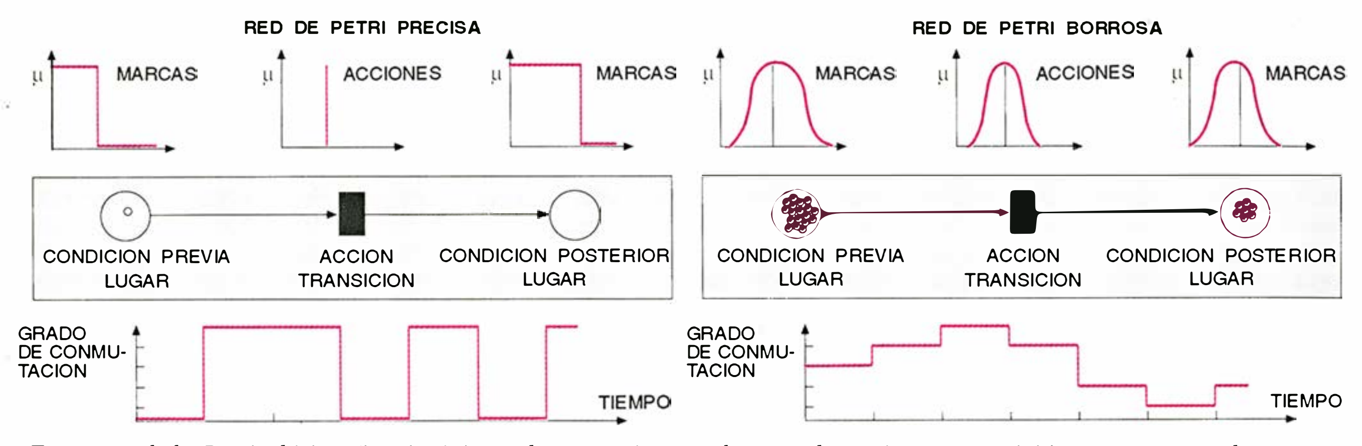
Hay otro principio moderno de producción, el de "a su tiempo", que se contrapone al anterior. Puesto que en la estructura de producción que impone no hay almacenes intermedios, o si los hay son muy pequeños, los productos preacabados deben entrar en el momento preciso para su elaboración. Por esta razón, los sistemas de control deben, sobre todo, poder interceptar las perturbaciones en su inicio con decisiones previsoras, con una "antealimentación". Cuando, por ejemplo, un paro de las máquinas en una fase previa ha de causar, en un (previsible) futuro, una menor fluencia de materiales en las fases siguientes, el sistema debe adaptarse inmediatamente y acortar los retrasos de producción de otros pedidos.

Es oportuno usar reguladores de situación en vez de los habituales de entrada y de salida, pues en ellos se programa un modelo bastante detallado del sistema que hay que ordenar, lo que les da una alta capacidad de prognosis. Pero esto sólo es posible, para un gran sistema de producción, si aligeramos el volumen de cálculo que semejante tarea requiere mediante el empleo de esbozos del estilo de los que se ha hablado más arriba.

El objetivo global se formula con sencillez: los pedidos deben ser satisfechos en el tiempo previsto con el menor coste de producción. En las grandes factorías se plantea un problema combinatorio de optimización complicadísimo. De ahí que se intente sustituir el objetivo global por una serie de objetivos parciales manejables, cuya consecución resulta necesaria para la satisfacción de aquél: cuanto menos tiempo estén inactivas las máquinas, mejor; las existencias no deben descender más allá de cierto mínimo; etcétera.

Los objetivos parciales pueden entrar en conflicto unos con otros. En este caso, el regulador del proceso calcula —de nuevo sobre la base de experiencias de expertos— un valor (borroso) de urgencia, una "fuerza motriz" para cada una de las exigencias en conflicto, y decide, en consonancia, el suministro de recursos. Un buen desarrollo productivo se caracteriza por una relación equilibrada de las fuerzas motrices.

Hemos experimentado en distintas aplicaciones industriales un regulador del proceso productivo que se basa en una red borrosa de Petri. (La comprobación ha sido un éxito.) Una red de Petri —estructura ideada por el matemático Carl Adam Petri— consta de componentes activos (las "transiciones", simbolizados por rectángulos), componentes pasivos (los "lugares", representados por círculos) y flechas, que siempre unen un componente activo con otro pasivo, o al revés. Así, pues, cada componente activo tiene componentes pasivos ante sí y tras de sí. Cuando se representa un sistema de producción, un elemento activo corresponde a un paso en la elaboración; los elementos pasivos antecedentes corresponden a los recursos necesarios para ese paso; y los ele-



*En una red de Petri clásica (*izquierda*), un lugar está ocupado o no lo está, una transición ocurre o no: la correspondiente función de pertenencia sólo vale 0 o 1. En una red de Petri borrosa (*derecha*) hay valores intermedios para el contenido de la marca y la actividad; lo mismo vale para el "grado de conmutación" de las transiciones. Así puede reproducir imprecisiones y distintas intensidades de trabajo*

mentos pasivos posteriores, a los productos. La estructura reticular reproduce, pues, las dependencias mutuas de los procesos parciales.

Un círculo puede llevar una marca. La señal simboliza que se ha cumplido la condición previa, verbigracia, la existencia de materia prima. Una transición puede darse o no. En el primer caso, el rectángulo borra las marcas de los círculos que le preceden y llena de ellas los círculos, anteriormente vacíos, que le siguen (es decir, se lleva a cabo un paso en la producción, con el uso de los recursos y la entrega de los productos).

Así, pues, tanto los lugares como también las transiciones sólo pueden aceptar dos estados (designados con 1 o con 0): "con marca" o "sin marca", "se da" o "no se da". Las complejas conexiones del proceso —con operaciones en paralelo y asincrónicas— y la amplia gama de posibilidades de acción apenas se podrán representar con esa bivalencia.

Para ello se sustituye la red precisa por una borrosa. Las transiciones aceptan en ésta cualquier valor intermedio entre 0 y 1; se capta así la disponibilidad de una fase de la elaboración. Un mismo lugar puede, además, llevar varias marcas.

Amén de representar un recurso, el lugar puede denotar también una característica cualitativa o un criterio parcial de bondad. El valor (contenido de la marca) que se atribuye a un lugar indica en qué medida se ha satisfecho el criterio correspondiente. Una gran desviación del estado debido desata una gran fuerza motriz, tendente a eliminarla.

Cuando ocurre una transición, las marcas de los lugares —correspondientes a las piezas o a las características de calidad— se desplazan del lugar antecedente al posterior. Las transiciones borrosas suceden con fuerza variable, dependiendo de la marca, de suerte que una o más marcas se desplacen entre lugares limítrofes. Se obtiene un flujo de marcas continuamente cambiante que se corresponde con el flujo real de las piezas.

La función de pertenencia asociada a un lugar o una transición debe reproducir la desviación de su estado respecto al debido, así como la importancia crítica de esa desviación; en el primer caso, la función de pertenencia tiene un recorrido vertical, y horizontal en el segundo. Con la elección de las funciones de pertenencia queda condicionado el criterio global a que se atendrá el proceso. La elección dimana de la capacidad de los expertos, que se introducen así, y de manera directa, en la concepción del modelo.

Para tener en cuenta, en un plan de producción, las evaluaciones de plazos, recorridos y tiempos de permanencia de las piezas en el almacén o en una máquina, se utilizan redes borrosas de Petri de evaluación temporal. En ellas, las transiciones desplazan sus marcas del lugar anterior al posterior tras cierto intervalo de conmutación definida, que coincide con el tiempo de realización de la operación productiva que hay que modelar. En correspondencia con las funciones de pertenencia para los lugares, hay funciones de evaluación que indican en qué medida una situación se desvía temporalmente del valor debido y cuán crítico resulta un retraso así. Mientras, las fuerzas motrices hacen que se puedan comparar el mantenimiento de las condiciones de trabajo y el de los plazos. Todo ello nos capacita para establecer si es mejor llenar un almacén o acelerar el cumplimiento de otro pedido.

Hay otras condiciones de producción que aparecen expresadas como lugares no valorados en la red. Caracterizan la disponibilidad de las fases de elaboración o el que estén listos otros recursos. De esos lugares no parte ninguna fuerza motriz. Su contenido de marca sólo describe el número de esos medios auxiliares.

Un sistema de control del proceso reproduce el estado de la instalación productiva para una ocupación adecuada de los lugares de la red borrosa de Petri. Sobre esta base se calcula una estrategia fabril al obtener, a partir de las valoraciones borrosas de lugar, los puntos temporales para la puesta en marcha de todas las operaciones. La imprecisión en la valoración de los lugares concede al sistema la libertad de asignar recursos globales a las operaciones que contribuyan a la estabilidad del sistema. Que un pedido tenga preferencia puede expresarse mediante una valoración de lugares que actúan globalmente. Otro componente del sistema, el diseñador de modelo, actualiza el modelo de red de Petri conforme, por ejemplo, a la situación del pedido. Para abocetar el modelo sirve una biblioteca de modelos orientada al objeto, cuya utilización no requiere ningún conocimiento especial sobre redes de Petri; basta con que se conozca el proceso productivo. (*Hans-Peter Lipp*)

Tomografía óptica

Imágenes ocultas

Quizá, de niño, puso la mano ante una luz y contempló, fascinado, una luminiscencia rojiza bajo su piel. Podemos sacar partido de tan sencillo fenómeno. Se pretende, en efecto, crear aparatos ópticos de construcción de imágenes que, a partir de las características de absorción, dispersión y difusión de la luz por los tejidos en el rojo e infrarrojo próximo, pongan de manifiesto estructuras, densidades e incluso procesos fisiológicos.

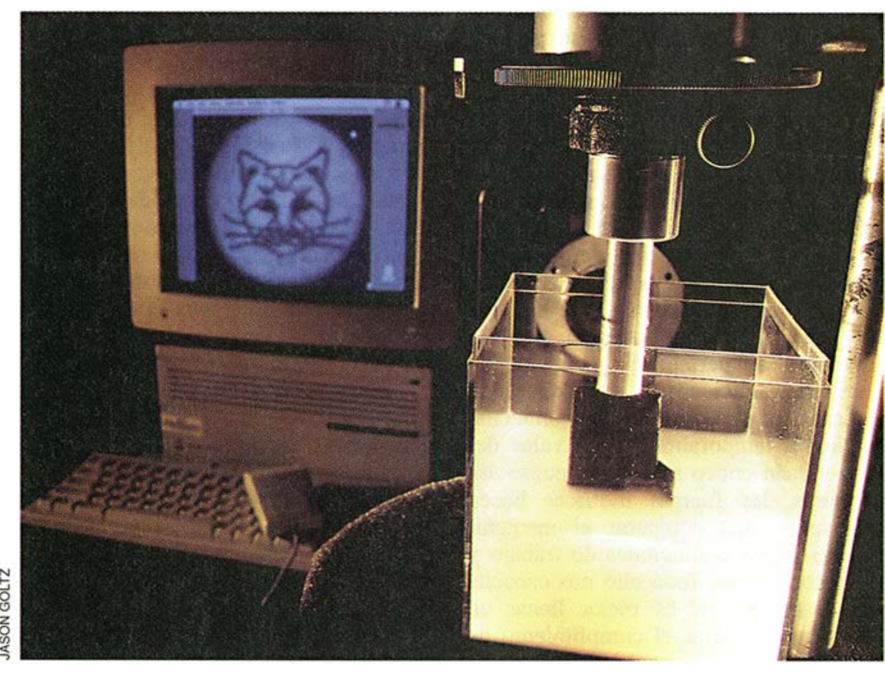
Esta nueva técnica, la tomografía óptica, se basa en que todos los elementos de los tejidos vivos, desde los orgánulos de las células hasta los niveles de oxigenación, transmiten, dispersan, absorben o afectan de algún otro modo a los fotones. Midiendo la intensidad, u otras propiedades, de la luz, e introduciendo la información en un ordenador, se pueden componer imágenes de los obstáculos que obligan a los fotones a seguir la trayectoria que siguen al atravesar el cuerpo humano.

Por ahora, la resolución de estos instrumentos ópticos no es comparable a la de otros métodos. La tomografía de emisión de positrones (TEP), la creación de imágenes por resonancia magnética (IRM) y la tomografía por ordenador (TC) proporcionan a médicos e investigadores vistas sin precedentes del interior del cuerpo humano con muy poco riesgo para el paciente. No obstante, este tipo de exploraciones requiere máquinas de gran tamaño, y hay que llevar al enfermo a donde estén.

La tomografía óptica, por otra parte, puede ser una buena manera de vigilar sin interrupción, junto al lecho, el estado funcional de los tejidos, dice David A. Benaron, de la Universidad de Stanford. Además, aseguran Benaron y otros entusiastas, estos aparatos podrían generar imágenes con mayor rapidez y a menor coste que otras opciones no quirúrgicas.

Puede que parte del entusiasmo esté justificado. La tecnología de imágenes ópticas da ciertos signos de precocidad. Varios grupos han empleado ya métodos ópticos para detectar cambios fisiológicos en el cerebro relacionados con hemorragias, hipoxia y las funciones cognoscitivas. Pero el cerebro no es el único órgano que podrá, según se espera, ser examinado mediante imágenes ópticas. Se están desarrollando instrumentos capaces de tomar "biopsias ópticas", no quirúrgicas, de cualquier parte del cuerpo. "La base de todo esto es que sepamos qué pasa de verdad cuando la luz moscardonea por los tejidos", dice Britton Chance, pionero de la tecnología óptica, de la Universidad de Pennsylvania.

Para que tengan éxito, estos aparatos deben afrontar la medición de las trayectorias caóticas de los fotones que sufren dispersión en el interior del cuerpo humano. La mayoría de los fotones son difundidos cientos, si no miles, de veces antes de que salgan del tejido y se los pueda detectar. Para abordar el problema, Chance y Arjun G. Yodh exponen un tejido a destellos de luz oscilante cuya amplitud se ha modulado. Estos destellos generan, entre todos, una "perturbación del brillo" semejante a una onda. Si un destello encuentra una zona de absorción o poder difusor más o menos alto, su intensidad se reducirá. El cambio altera, respecto a los destellos incidentes, tanto la intensidad como la fase de los destellos emergentes. Estas distorsiones revelan la extensión, densidad y localización de las estructuras que las causaron. Robert R. Alfano, director del instituto de espectroscopía ultrarrápida y láseres de la Universidad Metropolitana de Nueva York, ha adoptado un enfoque complementario al anterior. Trata de determinar áreas que absorben o difunden la luz a partir sólo del analisis de los fotones balísticos y de los serpenteantes, que emergen antes que los demás. El grupo de Alfano fue el primero en sacar provecho de la información proporcionada por esa luz, que se difunde muy poco. Usan una cámara de vídeo ultrarrápida, completada con un equipo registrador y analizador que captura sólo los fotones que emergen en los diez primeros picosegundos tras la emisión del destello. Hacen entonces que el objeto gire con respecto al instrumento, para así crear imágenes tridimensionales. Por este método, el grupo de Alfano ha descifrado la imagen de estructuras de dos milímetros de diámetro en un medio artificial semejante al tejido humano, de siete centímetros de grueso. El proceso dura menos de un minuto.



Se oculta en un líquido opaco de nueve centímetros de espesor el dibujo de un gato, esbozado, con una amplitud de 1,2 centímetros, en una fina lámina de celofán. La imagen se reproduce en la pantalla de un ordenador gracias a un aparato de construcción de imágenes óptico del Centro de Tecnología Avanzada de la Universidad Metropolitana de Nueva York, dirigido por Robert R. Alfano

El grupo de Benaron ha construido el segundo aparato de imágenes ópticas que se probará clínicamente. Le han dado el nombre de "pantalla de tiempo de propagación y absorción"; mide el tiempo que emplea un porcentaje fijo de los fotones más rápidos en atravesar la muestra. Esta técnica sigue prescindiendo de los fotones que más confunden: los que se han dispersado mucho y emergen en último lugar. Pero toma partículas moderadamente dispersadas. "La resolución no es la de las radiografías corrientes, pero por ahí se empieza", dice Benaron.

Los funcionarios del estadounidense Instituto Nacional de la Salud creen que las esperanzas que despierta la tomografía óptica justifican un poco de apoyo económico. Uno de los proyectos que respaldan trata de aplicar la tomografía óptica a la diagnosis del cáncer de mama en mujeres de menos de 40 años. "Las mamografías de rayos X no distinguen bien el cáncer en las mujeres jóvenes", indica Chance. La radiación de una mamografía tradicional de rayos X se dispersa demasiado en los tejidos jóvenes y no produce imágenes útiles.

El grupo de Benaron también disfruta de las subvenciones oficiales; van a probar en seres humanos un aparato que vigila el nivel de oxígeno en los tejidos cerebrales de los bebés. El instrumento, tejido con hilos de fibra óptica, se adaptará cómodamente a la cabeza del recién nacido como si fuera una cinta para el sudor. Sensores,

distribuidos a intervalos regulares por todo este sistema óptico, recibirán las señales de luz que se dispersen a lo largo de dos ejes que irán de un lado del cráneo al otro. Las coordenadas de las zonas anóxicas se obtendrán calculando la longitud de la trayectoria y la intensidad de la luz que pasa a través del cráneo en diferentes direcciones. Benaron predice que el año que viene podrían estar disponibles para uso clínico unos aparatos espectroscópicos sencillos basados en esta técnica, si los aprueba la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) de los Estados Unidos. Mediscience Technology, empresa que posee las patentes de varios de los proyectos de Alfano, está llevando adelante los trámites para obtener el visto bueno. Las primeras versiones se encargarían probablemente de vigilar los niveles de glucosa de diabéticos y otras tareas por el estilo.

Sin embargo, puede que estas técnicas ópticas estén disponibles antes para fines que no tienen nada que ver con la medicina, dice Eva Sevick, profesora de ingeniería química de la Universidad Vanderbilt. Sevick estudia su posible empleo en la vigilancia de los gases tóxicos emitidos por chimeneas.

Pese a su entusiasmo, quienes investigan en este campo se muestran recelosos. "No hay tecnología nueva que no prometiese ser más barata", dice Benaron. "No queremos que éste sea el nuevo invento que todo el mundo ha de tener". Para que no se llegue a esa situación, los grupos que estudian las diferentes facetas de estas técnicas se mantienen en estrecho contacto. "Algunos dicen que en un año dispondremos de la creación óptica de imágenes. Yo no lo creo", avisa Sevick. "No es seguro que funcione, pero si lo hace, los beneficios serán considerables". (*Kristin Leutwyler*)



Bernard S. Meyerson, investigador de IBM, inspecciona una máquina de ultraalto vacío para la deposición química de vapor, técnica que él mismo ideó para depositar capas atómicas de aleación de silicio-germanio sobre pastillas de silicio

Materiales

Pastillas de silicio-germanio

Los fabricantes electrónicos nunca han sentido simpatía por el arseniuro de galio, material que da mayores velocidades que la vieja materia prima de la industria, el silicio. Pero por mucho que valoren la celeridad, los fabricantes de pastillas se resisten a abandonar inversiones de miles de millones de pesetas en factorías de semiconductores de silicio para emprender un proceso de fabricación completamente diferente. La llegada al mercado de una aleación de silicio y germanio significa que quizá no tengan que hacerlo.

Investigadores de IBM y Analog Devices han hecho saber que de su colaboración ha surgido el que será, pronto, el primer dispositivo comercial hecho de tal aleación. "Marcará el camino del silicio durante los próximos cinco, diez o quince años", dice Bernard S. Meyerson, del Centro de Investigación Thomas S. Watson de IBM.

Meyerson y sus colaboradores describen un transistor bipolar cuya base está constituida por la aleación de silicio y germanio. La base conecta y desconecta esos conmutadores en miniatura. El objeto del dispositivo es convertir una señal digital en su equivalente analógica al ritmo de mil millones de ciclos por segundo (un gigahertz). El convertidor digital-analógico de 12 bits opera más rápidamente que cualquier convertidor de silicio construido hasta la fecha. Consume menos y su velocidad es comparable a la de los más rápidos convertidores de señal basados en el arseniuro de galio.

Este año, Analog Devices, proveedor de procesadores semiconductores de señal analógicos y digitales, empezará a vender estos dispositivos que son elementos básicos de las redes digitales que las compañías telefónicas y de transmisión por cable pretenden que lleguen a toda casa y oficina. Un convertidor de señal podría tomar una señal transmitida a casa por fibra óptica y darle la forma analógica que el televisor requiere. IBM fabrica las pastillas; Analog Devices proyectó el convertidor.

A diferencia del arseniuro de galio, los dispositivos de silicio y germanio se pueden fabricar mediante los mismos procesos que los circuitos integrados habituales. Dada la larga experiencia de los fabricantes de pastillas con el silicio, la electrónica del silicio-germanio puede alcanzar velocidades más altas sin costar más que los circuitos de silicio bipolares corrientes. Hasta la fecha, NEC, Daimler Benz y otros gigantes de la electrónica que andan explorando estas técnicas han fabricado transistores sueltos, pero todavía no han dicho nada de circuitos integrados.

Cada convertidor de silicio-germanio fabricado por IBM contiene 3000 transistores y otros 2000 elementos (condensadores, resistencias). Este número es pequeño comparado con el millón largo de transistores que puede llegar a contener una pastilla digital, pero para un circuito analógico es un alto nivel de integración.

IBM ha tratado de aprovechar que los electrones se mueven más deprisa dentro de la base gracias al elevado campo eléctrico de la aleación. Causa ese campo el aumento gradual de la cantidad de germanio a lo ancho de la base, que crea una diferencia de potencial eléctrico, una especie de pendiente por la cual se aceleran los electrones.

Para emparejar el silicio-germanio con un substrato de pastilla de silicio,

Meyerson tuvo que resolver un serio problema: la red cristalina del silicio-germanio no coincide con la del substrato de silicio puro. Resolvió la dificultad modificando una técnica corriente, la deposición química de vapor. Una mezcla de gases deposita una delgada película de átomos de silicio y germanio sobre un substrato de silicio; con un vacío ultraalto se realiza el proceso a 500 grados Celsius, menos de la mitad de la temperatura a la que funciona el sistema de deposición química de vapor corriente, el que se emplea con el silicio. En este ambiente se puede controlar la construcción precisa de cada capa de átomos. Los átomos de silicio y germanio tienden a no quedarse en su sitio a las altas temperaturas usuales en el proceso hasta ahora conocido.

El futuro de los cultivadores de germanio parece prometedor. IBM informó el pasado verano que las máximas frecuencias de los transistores sueltos de germanio-silicio iban de 110 a 117 gigahertz. Son más de dos veces superiores a las alcanzables con un transistor de silicio, y pueden compararse favorablemente con las de muchas pastillas de arseniuro de galio. Analog Devices está considerando introducir la aleación silicio-germanio en la parte electrónica de un teléfono digital sin cable que funciona a frecuencias nada menos que de tres gigahertz (la velocidad tasada de los circuitos que usan transistores es siempre mucho menor que la de funcionamiento libre de un transistor suelto). La circuitería para transmitir y recibir radioseñales podría reducirse, de una amalgama de transistores y condensadores separados, a una sola pastilla.

Los investigadores de IBM hablan también de integrar los transistores bipolares de germanio-silicio en una pastilla portadora de una tecnología de semiconductor de metal-óxido (CMOS) complementaria, es decir, los baratos dispositivos lógicos y de memoria que constituyen la base de la mayor parte de la electrónica de los ordenadores personales y equipos de comunicaciones. Los componentes CMOS servirían como microprocesadores y memoria; los circuitos bipolares, como procesadores de alta velocidad de señales de radio que fuesen, por ejemplo, de un teléfono manual a una estación base de telecomunicaciones.

El proyecto silicio-germanio marca una nueva era en IBM. "En el pasado, nos habríamos guardado esta técnica hasta 1998", dice Meyerson. La rapidez quizá sirva para mantener vivo el romance de los proyectistas de materiales con uno de los elementos más abundantes de la geosfera. (*Gary Stix*)

Taller y laboratorio

Wayne Garver y Frank Moss

Luciérnagas electrónicas

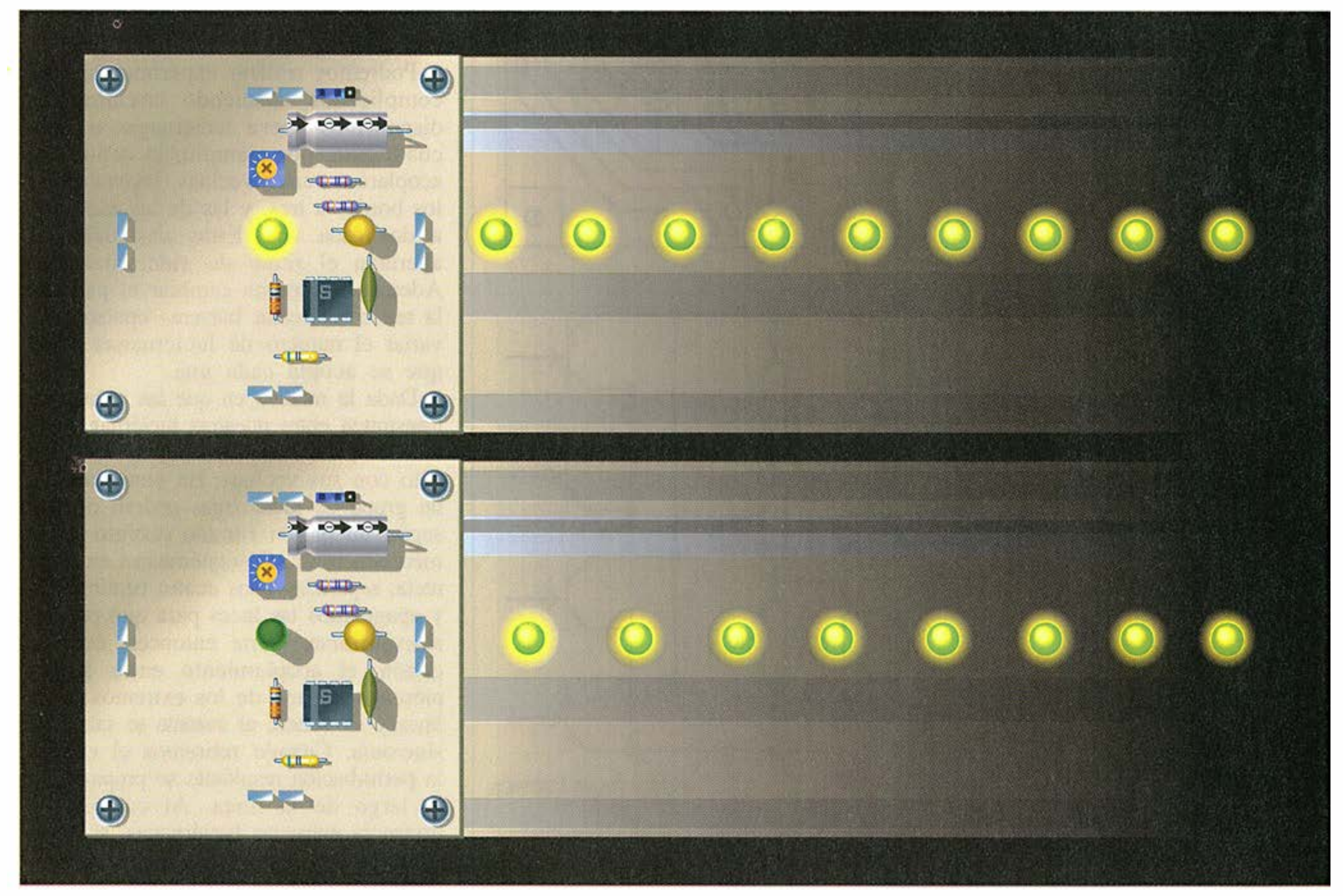
Uno de los efectos más espectaculares de oscilación acoplada es la sincronización en masa de millares de luciérnagas de ciertas especies. Steven H. Strogatz y Renato Mirollo demostraron que ese sincronismo se produce cuando se parte de un sistema matemático que se basa en cierto circuito eléctrico, el oscilador de relajación (*véase, en este mismo número,* "Osciladores acoplados y sincronización biológica", por Steven H. Strogatz y Ian Stewart). Construir un circuito de éstos y hacer que el fenómeno se manifieste sobre una mesa, en una habitación a oscuras, es algo bastante fácil.

WAYNE GARVER y FRANK MOSS trabajan en el departamento de física de la Universidad de Missouri en San Luis. Cuando no construye luciérnagas, Garver diseña equipos electrónicos para estudiar la fatiga en los ejercicios físicos. Moss es profesor de física y biología. Le interesan los efectos de las perturbaciones aleatorias sobre las neuronas sensoriales.

Queríamos que los osciladores corroborasen, en lo posible, la idea que tenemos de cómo se sincronizan las luciérnagas con la caída del crepúsculo. Por eso, los acoplamos mediante destellos luminosos. A la luz del día, sus fotodetectores, inundados por la luz ambiental, destellan a su aire, pero en una habitación a oscuras reacciona cada oscilador a los destellos de los demás y acaban todos brillando al unísono.

Para que nuestras luciérnagas actúen se carga un condensador hasta que la tensión entre sus placas alcance un valor umbral; se descarga entonces el condensador a través de un conmutador, la luciérnaga destella y se repite el ciclo. Cuando una luciérnaga recibe el destello de otra vecina, la carga que fluye al condensador aumenta por un instante en una fracción proporcional a la intensidad del destello. Ese aumento hace que la luciérnaga acabe su ciclo antes, con lo que el momento en que se dispara se acerca al momento de disparo de aquella de la cual recibió el destello. Tras algunos ciclos, ambas destellarán en sincronía. (Este sencillo análisis pasa por alto la influencia de la luciérnaga en el ciclo de su vecina; ahora bien, en tanto la curva de carga se ralentice conforme se aproxima al umbral de disparo, ambas llegarán a sincronizarse.)

Lo que pasa con dos es verosímil que valga para un número mayor, y sería natural que un grupo extenso de



1. Dos luciérnagas artificiales sincronizan sus destellos por la interacción mutua de tales resplandores. Las controla un sencillo oscilador compuesto por un circuito temporizador, un diodo emisor de luz y un fototransistor que capta la luz que le llega. Con múltiples luciérnagas podemos percibir ritmos que van más allá de la mera sincronía

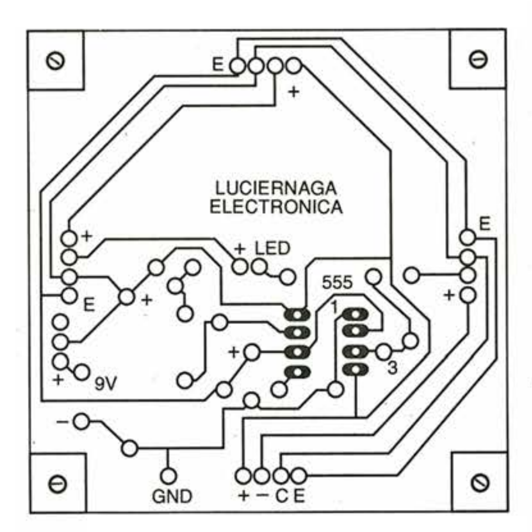
La construcción de luciérnagas electrónicas

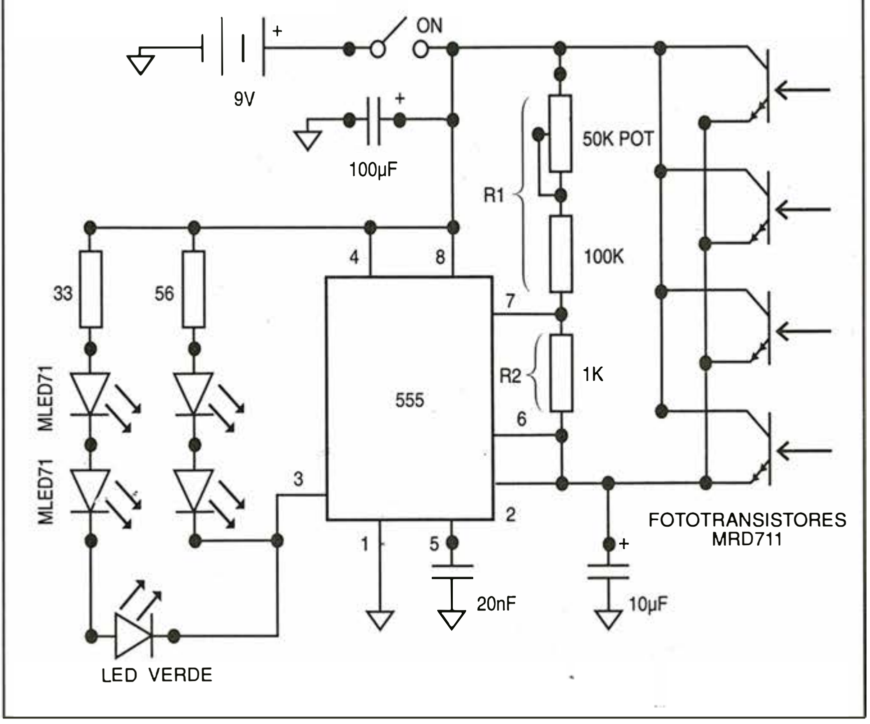
El corazón de nuestro dispositivo es un temporizador LM555 (*esquema al pie*). El LM555 es todo un caballo de batalla en los proyectos que requieran comportamiento periódico. Posee un conmutador interno que se cierra cuando la tensión entre sus puntas rebasa los dos tercios de su tensión de alimentación y se abre cuando la tensión baja a menos de un tercio de la tensión de alimentación. El que no dependa de la tensión absoluta sino de fracciones fijas de la misma lo hace insensible a pequeñas variaciones, característica crucial en los circuitos accionados por acumuladores. El condensador se carga a través de la resistencia R1 y se descarga por R1 y R2.

En paralelo con R1 hay conectados cuatro transistores infrarrojos (uno por cada dirección). Cuando "ven" un destello de luz, pasan carga al condensador, con lo que se incrementa la tensión en el mismo y se acorta el ciclo de carga. En el diseño hemos incluido un reóstato de 50 kiloohms al objeto de que los destellos de cada luciérnaga estén ajustados aproximadamente a la misma frecuencia. Para la mayoría de los experimentos, lo mejor es una cadencia en la oscuridad de un destello por segundo.

Cuando se descarga el condensador, la salida digital del 555 activa cuatro diodos emisores de luz infrarrojos (DEL), que envían luz a otras luciérnagas electrónicas para ponerlas en sincronía. Un DEL verde imita el color de una luciérnaga natural e informa al experimentador humano de que la luciérnaga destella.

Aunque sea posible montar una luciérnaga en una placa soporte, la reproductibilidad aconseja que se emplee un circuito impreso. Nos servimos de un kit para transferir el patrón del circuito (*a la derecha*) a una superficie de cobre, para grabarlo. Un kit basta para cinco luciérnagas.





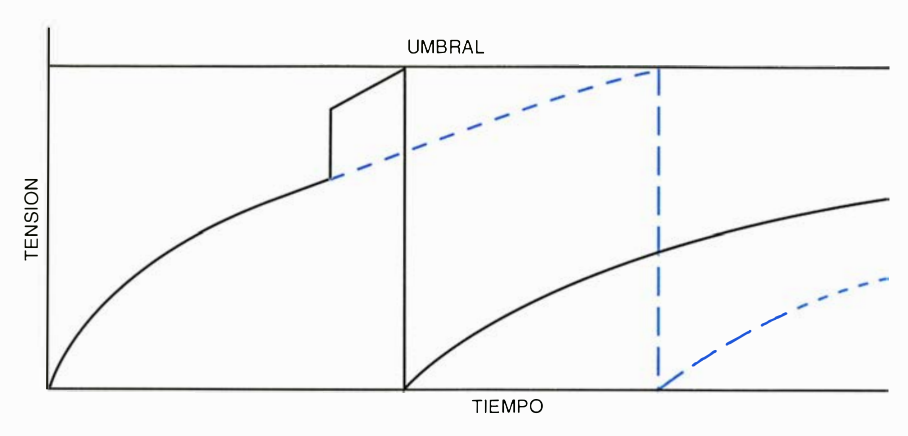
osciladores luciérnaga se sincronizara también. Para observar el efecto de sincronía necesitaremos, al menos, dos luciérnagas, pero será mejor probar con tres, cuatro e incluso nueve.

El experimento más sencillo con luciérnagas artificiales es el de determinar el tiempo que tardan en sincronizarse en función del acoplamiento entre ellas. Cuanto más intensa sea la señal que reciban los fototransistores, tanto menos tardarán los circuitos en marcar el paso. Al encender las luciérnagas, destellan al azar. Pero situemos dos de ellas separadas unos pocos centímetros, con los detectores y los diodos emisores de luz (LED, del inglés "light emitting diode") enfrentados, y apáguese la luz; a los pocos segundos se habrán sincronizado. El tiempo exacto que lleva que se sincronicen dependerá de cuáles sean las fases relativas de las luciérnagas cuando se apague la luz; para conseguir resultados lo más precisos posible, háganse varios tanteos.

Para variar la intensidad del acoplamiento entre las luciérnagas, ajustemos la distancia entre ellas. La cantidad de luz procedente de un LED que llega al detector vecino es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos. ¿Obedece a una curva similar el tiempo medio de sincronización?

Podremos realizar experimentos más complicados añadiendo circuitos. Si disponemos nueve luciérnagas en una cuadrícula, por ejemplo, la central se acoplará a cuatro vecinas, las cuatro de los bordes a tres, y las de las esquinas, a dos cada una. Estas desigualdades alterarán el ritmo de sincronización. Además, podemos cambiar el paso de la red o intercalar barreras opacas para variar el número de luciérnagas a las que se acopla cada una.

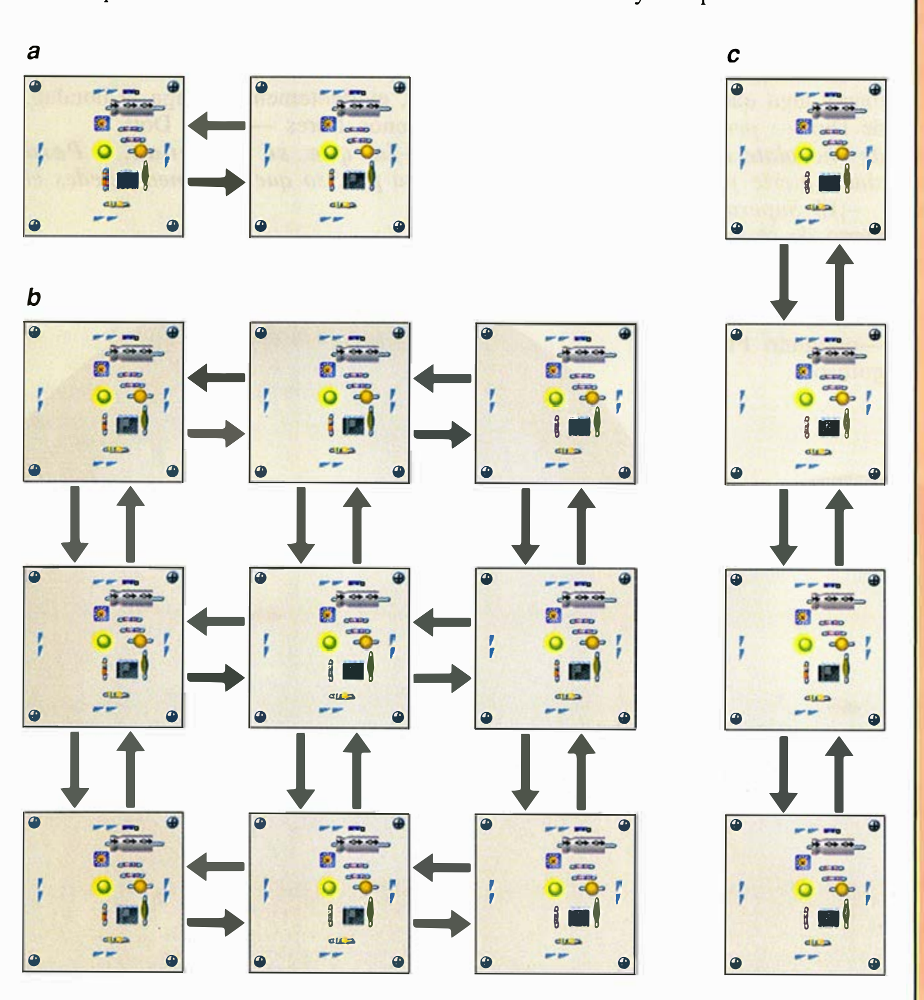
Dada la manera en que las señales se transmiten entre nuestras luciérnagas artificiales, cada una de ellas se coordina sólo con sus vecinas. En consecuencia, un grupo de luciérnagas podrán oscilar según un patrón rítmico distinto de la mera sincronía. Coloquémoslas en línea recta, separadas unos cuatro centímetros, y apaguemos las luces para que puedan sincronizarse. Corte entonces, con un cartón, el acoplamiento entre la luciérnaga de uno de los extremos de la línea y su vecina; al instante se saldrá de sincronía. Cuando retiremos el cartón, la perturbación resultante se propagará a lo largo de la línea. Al cambiar la distancia entre las luciérnagas, se pone de manifiesto que la celeridad de la propagación depende estrechamente de la intensidad del acoplamiento. (Podemos iterar el experimento con ocho osciladores dispuestos en círculo, en cuyo



2. Adelanto de un destello

caso la perturbación se propagará en sentido horario o antihorario.)

Todos los experimentos descritos se basan en la hipótesis según la cual las frecuencias naturales de los osciladores son lo suficientemente parecidas para que puedan pasarse por alto las diferencias entre ellas, tal y como se hace en la demostración matemática de la sincronización por Strogatz y Mirollo. Si cambiamos adrede la frecuencia de una de las luciérnagas de modo que difiera bastante de la frecuencia de las vecinas, podremos estudiar otra clase de fenómenos. Por ejemplo, una luciérnaga "que vaya por libre" en la esquina de una cuadrícula de nueve retrasará el momento en que se sincronicen las demás. Y aún más: al cabo del rato esa luciérnaga hará que un subgrupo de sus vecinas se salga de sincronía, y luego todas las demás. En este caso, el acoplamiento entre los osciladores sirve, en última instancia, para destruir el orden y no para crearlo.



3. Distintas ordenaciones de luciérnagas artificiales

MATERIALES

INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

ha publicado sobre el tema, entre otros, los siguientes artículos:

Comunicaciones ópticas por cables submarinos, Raimundo Díaz de la Iglesia.
Número 117, junio 1986.

Nuevos metales, Bernard H. Kear.
Número 123, diciembre 1986

Nuevas cerámicas, H. Kent Bowen.
Número 123, diciembre 1986

Nuevos polímeros, Eric Baer.
Número 123, diciembre 1986

Materiales para el transporte terrestre, W. Dale Compton y Norman Louis A. Girifalco.
Número 123, diciembre 1986

Materiales para la navegación aerospacial, Morris A. Steinberg.
Número 123, diciembre 1986

Nuevos materiales y economía, Joel P. Clark y Merton C. Flemings.
Número 123, diciembre 1986

Materiales para la información y la comunicación, John S. Mayo.
Número 123, diciembre 1986

Electrones balísticos en semiconductores, Mordehai Heiblum y Lester F. Eastman.
Número 127, abril 1987

Transistores de arseniuro de galio, William R. Fresley.
Número 133, octubre 1987

Fractura del vidrio, Terry A. Michalske y Bruce C. Bunker.
Número 137, febrero 1988

Plásticos que conducen electricidad, Richard B. Kaner y Alan G. MacDiarmid.
Número 139, abril 1988

El dispositivo de efecto cuántico, ¿transistor del mañana?, Robert T. Bate.
Número 140, mayo 1988

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Un largo viaje: huida de un universo en expansión

Cuaderno de bitácora del capitán Kink, fecha estelar 2531,5. El Superambicioso *ha escapado por poco de que le proyectase al infinito un campo newtoniano de idealización...*

La situación volvía a la normalidad. O eso parecía. La teniente Yahoota advirtió que el campo de idealización había hecho que los vectores de onda cuánticos de la nave colapsasen. El señor Flakeoff anunció que los operadores de aniquilación y creación habían sido... comidos por alguien. "¡El gato de Schrödinger otra vez!", se desesperó el capitán Kink. "Lo mataré", pensó, "a no ser que se haya convertido otra vez en una superposición de estados. ¿A quién se le ocurriría meterlo en esa caja?" El médico de a bordo, el doctor Latazo, empezó a contar lo que, en sus días del *Indefendible*, les había ocurrido con otro gato. "Estábamos", decía, "en órbita alrededor del planeta Hipocondría con toda una colonia de superratones trantorianos que se nos había colado dentro; entonces... " Pero un nuevo peligro se aproximaba...

–¡Capitán, un objeto extraño a medio año luz! —previno Abi Dott.

–Es grande —dijo Flakeoff.

–Es verde —observó Kink.

–Es extraño —susurró Yahoota.

–Es, capitán —sentenció Pock—, un enigma macroverduzco.

–Lo que quiere decir...

–Bueno... que es una cosa verde, grande y rara. Un ser espantosamente peligroso. ¡Menos mal que no lo tenemos de frente, menos mal!

En ese momento la nave se estremeció, las luces se apagaron, la computadora sufrió un síncope nervioso. El enigma macroverduzco removía el espacio-tiempo circundante.

–¡Nave en rotación —exclamó el ingeniero Abi Dott— para la prueba de la brújula gluónica!

–¡Pero no haga eso! —ordenó el capitán. Era demasiado tarde. El *Superambicioso* ya estaba frente al macroverduzco, que lo envolvió con una maraña de informes pseudópodos pardos. Se produjo un indescriptible sonido como de deglución; después, silencio, sólo silencio.

–Lamento lo ocurrido —resonó entonces algo que hacía pensar en la voz de Dios—; *pero una nave recubierta de chocolate es una tentación demasiado fuerte para mí.*

–¡El *Superambicioso* no está recubierto de chocolate! —protestó Kink.

–Ahora sí —dijo Pock, que leía los datos del analizador.

–¿Relleno de almendras? —preguntó Flakeoff, goloso.

–No, pero sí parece que contiene algún que otro melón —dijo Kink, lanzándole una mirada asesina. Se dirigió entonces a la voz:

–¿Puedo saber quién es usted?

–Soy una Voz Desencarnada.

–Encantado de saberlo —dijo Pock.

–Señor Pock, haga el favor de callarse —la voz de Kink era tranquila, controlada; quizá demasiado—. ¿Por qué se ha apoderado usted de mi navío? —le preguntó a la Voz.

–Para divertirme.

–Tiene usted que liberarnos inmediatamente. Este navío forma parte de la Flota Estelar y si nos causa algún daño será usted perseguido hasta los confines del universo y hecho pedazos.

Pock le dio unas palmaditas en el hombro para tranquilizarle.

–Dicho sea sin intención de ofender, evidentemente. Tenga la bondad, déjenos libres —terció Dott.

–Ya que se empeñan... Pero será preciso que se ganen ustedes el



1. *El* Superambicioso *se desplaza por un universo en expansión. ¿Alcanzará la nave espacial los confines del universo?*

derecho a regresar a su propio universo.

–¿Y cómo hacerlo?

–Con un test de inteligencia e iniciativa. He desajustado sus motores de distorsión de espacio-tiempo de manera que su velocidad máxima sea de un metro por segundo. Su nave se encuentra situada en el centro de un universo artificial de un kilómetro de radio. Tienen ustedes que decirme cuánto tiempo tardarán en alcanzar el borde del universo.

Yahoota pulsó una serie de teclas en el ordenador.

–Mil segundos, mi capitán —susurró la oficial.

–*Todavía no he terminado* —prosiguió la Voz—. *Cada segundo, el radio de ese universo aumenta instantáneamente y se hace un kilómetro mayor.*

–En ese caso, no podremos salir jamás —protestó Kink—. El borde se alejará más que nuestra velocidad máxima de aproximación.

–*En efecto. Pero al dilatarse el universo, su navío es arrastrado con él, y su posición varía proporcionalmente.*

–Aun así —insistió Kink—. El borde se aleja de nosotros a una velocidad muy superior a la nuestra. No tenemos ningún medio de...

–Capitán, tranquilícese, tenga la bondad, y déjeme pensar —dijo Pock—. En el primer segundo recorremos un metro, y nos faltan 999. Entonces el universo aumenta su radio en un kilómetro, y al hacerlo, nos arrastra con él. Así que nos encontraremos a dos metros del centro, con 1998 por recorrer.

–Correcto.

–En el segundo siguiente recorremos un metro más, o sea, tres metros en total, y nos faltan 1997. Inmediatamente el universo aumenta su radio en un kilómetro, o sea, en un 50 por ciento, con lo que nos situamos a 4,5 metros del centro, y faltan 2995,5 metros por recorrer. Al segundo siguiente...

–Pock —dijo Kink esforzándose en mantener la calma—. A este paso va usted a tardar más en resolver el problema que el tiempo real correspondiente a la solución, sea la que sea.

–Me parece que todo es cuestión de fracciones, mi capitán —dijo Latazo, para sorpresa general.

–¿Cómo dice?

–Cuando el universo aumenta, arrastrando consigo al *Superambicioso*, la fracción recorrida ya de la distancia no cambia. Si consideramos el problema como un problema de fracciones quizá lleguemos a la respuesta más deprisa.

VALORES DE LOS NUMEROS ARMONICOS

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
H_n	0	1	3/2	11/6	25/12	137/60	49/20	363/140	761/280	7129/2520	7381/2520

–Fracciones... sí, claro. ¿Puedo torpedearlas fotónicamente? —preguntó Kink enseguida—. ¿No? Pues no es mi trabajo entonces. ¿Qué piensa usted, Pock?

–El primer segundo recorremos 1/1000 del radio, en el segundo, 1/2000, en el tercero, 1/3000, y así sucesivamente.... En el n-ésimo segundo recorremos $1/(1000 \times n)$ de la distancia, con lo que al cabo de n segundos la fracción de radio recorrida en total es:

$$1/1000\,(1 + 1/2 + 1/3 + \ldots + 1/n),$$

o sea, $(1/1000)\ H_n$, siendo H_n el n-ésimo número armónico. En consecuencia, el número de segundos suficientes para alcanzar el borde será cualquier valor n que haga que el valor de H_n sea mayor o igual que 1000. Dando por supuesto, capitán, que eso llegue a suceder, claro está.

–¡Pues ése es el quid de la cuestión! —dijo Kink—. Y por las trazas, no va a ser así. Al crecer n, cada nuevo término $1/n$ es más pequeño que el anterior, con lo que la suma culminará en un valor muy pequeño. Piense en la suma:

$$(1/1 + 1/2 + 1/4 + 1/8 + \ldots + 1/2^n),$$

que se conserva siempre menor que 2.

–Ya sé adónde quiere llegar, capitán —dijo Pock—, pero me parece que el ejemplo de usted puede ser engañoso. Usted quiere decir que, si la serie armónica fuese convergente, tal vez su suma fuera menor que 1000, y en tal caso lo serían también todos los H_n, cualquiera que sea n, mientras que si la serie es divergente, los H_n llegarán a superar cualquier número fijado de antemano, y en particular, pasarán de 1000.

–¿Era eso lo que yo quería decir? —dijo Kink con aire perplejo.

–Sí, mi capitán. Puedo darle mi palabra.

–Increíble —murmuró Kink—. Jamás hubiera pensado que yo pudiera querer decir cosas como ésa. ¡Soy más inteligente de lo que pensaba!

–Por desdicha —siguió Pock—, no existe ninguna fórmula conocida que exprese H_n como función sencilla de n, salvo que se utilice la propia serie o alguna de sus variantes. De hecho, los valores de los numeradores y denominadores de las fracciones irreducibles de H_n son bastante irregulares.

–Mi capitán, ¿puedo utilizar el ordenador? —exclamó más que preguntó Flakeoff.— Quiero preguntarle cuántos términos hay que ir sumando para superar los números 1, 2, 3, 4, 5 ... uno por uno. De esta forma podremos ver rápidamente lo que sucede.

–Buena idea, señor Flakeoff —dijo Kink.

–Véamoslo, pues —dijo la Voz Desencarnada.

... *Varios días más tarde...*

–¿Cómo están las cosas, señor Flakeoff? —quiso saber Kink.

–La suma acaba de rebasar 18. Da la impresión de que ahora la suma se ha ralentizado mucho, mi capitán.

–He aquí una bonita demostración, señor Pock —dijo Kink.

–¿Una demostración de qué, mi capitán?

–De que la serie armónica es convergente, y además, hacia un valor no mucho mayor que 18 —dijo Kink con tono de suficiencia.

–Reconozco, capitán, que así parece, confesó Pock.

A Kink casi se le cae la baba.

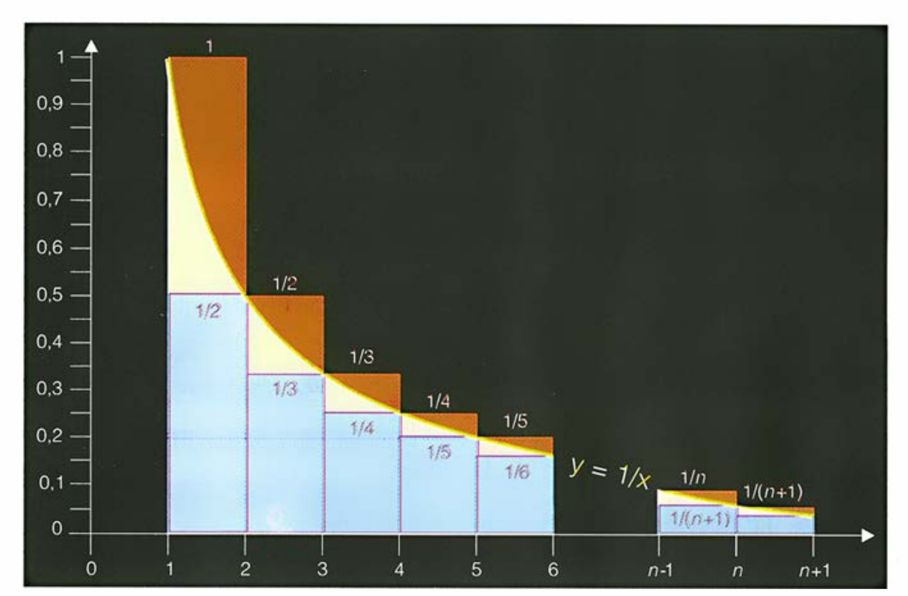
–Pero las apariencias engañan —prosiguió Pock.

Kink pareció sorprendido.

–¿Que quiere decir eso, señor Pock?

–Puedo demostrar, por pura inteligencia, sin necesidad de cálculos largos, que la serie armónica es divergente. Pero su divergencia es muy lenta, y por eso los cómputos del ordenador parecen converger. La verdad es que, continuando lo suficien-

H_n	ES MAYOR QUE	CUANDO n ES MAYOR QUE
1,500	1	2
2,083	2	4
3,019	3	11
4,027	4	31
5,002	5	83
6,004	6	227
7,001	7	616
8,000	8	1674
9,000	9	4550
10,000	10	12367
11,000	11	33617
12,000	12	91380
13,000	13	248397
14,000	14	675213
15,000	15	1835422
16,000	16	4989229
17,000	17	13566308
18,000	18	36797086



2. La suma de los n *primeros términos de la serie armónica está acotada entre Log(*n *+ 1) y Log* n *+ 1*

te, el ordenador llegará, por truncamiento, a convertir en cero el nuevo término $1/n$, pues no puede representar los números con precisión infinita. ¡Y a partir de ese momento todas las sumas se mantendrán constantes! ¡Los ensayos con ordenador pueden resultar engañosos!

–Bien. Ha aprendido usted a desconfiar de los ordenadores.

–¿Desconfía usted de los ordenadores?

–Yo soy un ordenador. Soy un hipermegaordenador superengañador muy potente instalado en vuestro propio continuo de espacio-tiempo por una raza omnipotente de intelectos pangalácticos.

–Hay MacDonalds en cualquier sitio, ¿no es cierto? Bueno, ¿en qué estábamos?... ¡Ah, sí! Supongamos que la serie se escriba de la forma siguiente:

$$1 + 1/2 + (1/3 + 1/4) + (1/5 + 1/6 + 1/7 + 1/8) + (1/9 + 1/10 + 1/11 + ... + 1/16) + ...$$

de manera que cada paréntesis tenga doble número de términos que el precedente. Entonces cada paréntesis es mayor que 1/2, por lo que la suma de la serie habrá de ser mayor que:

$$1 + 1/2 + 1/2 + 1/2+,...,$$

suma que excede de cualquier valor que se desee.

–Pero entonces, ¿cómo interpretar los cálculos por ordenador del señor Flakeoff?

–Para alcanzar el valor 18 mediante la introducción de paréntesis explicada y la minoración de cada uno por 1/2 harían falta el 1 inicial más 2×17 paréntesis. El denominador correspondiente al último sumando del n-ésimo paréntesis es 2^n. Podemos tener la seguridad de que la suma pasará de 18 si sumamos hasta $n = 2^{34}$, lo que significa más de diecisiete mil millones de términos.

–Pero su método sólo da una acotación inferior —señaló Flakeoff—. Tal vez una estimación más estudiada permita rebajar esos diecisiete mil millones.

–Esta forma suya de pensar, tan laboriosa y tortuosa, me tiene fascinado.

–Puedo responder a su observación —prosiguió Pock—. El valor que se aproxima mucho a H_n es Log n, donde Log es el logaritmo neperiano. Eso se demuestra por cálculo integral, dijo. Se integra la función $1/x$ entre 1 y n y se compara este valor con...

–¡Vale, vale! —cortó Kink, irritado—. ¡Continúe usted solo, resuelva el problema y sáquenos de aquí de una vez!

–La diferencia H_n — Log n tiende a una constante cuando n tiende a infinito, continuó Pock, impertérrito. Es la llamada constante de Euler, que se denota γ. Su valor es:

$$\gamma = 0,5772156649...$$

Por lo tanto, si queremos que $H_n \approx 1000$, se tiene: Log $n + \gamma \approx 1000$, o sea,

$$n \approx e^{1000 - \gamma},$$

siendo $e \approx 2,71828182...$ la base de los logaritmos neperianos. Por lo tanto, el número de segundos requeridos para alcanzar la frontera del universo se aproxima mucho a $e^{999.423}$ segundos, o sea, unos $10^{434.039}$ segundos, equivalentes a unos ¡$3,46 \times 10^{426}$ años!

–¿Y qué radio tendría entonces el universo?

–Pues $n + 1$ kilómetros. El radio estaría próximo a 10^{434} kilómetros.

–Permítame que le felicite. Han resuelto ustedes mi problema, por lo que ya son libres de abandonar mi universo artificial —dijo la Voz.

–¿Pero cómo? —preguntó Kink.

–Es sencillo. Basta con alcanzar su frontera.

–Muy bien. Yahoota, pónganos en camino. Factor de distorsión espaciotemporal igual a 7; dirección a ... a la frontera del universo.

–Pero, mi capitán, todas las direcciones conducen a la frontera del universo.

–Pues entonces tome usted la más sencilla. ¡Vamos, Yahoota, un poco de iniciativa!

–¿No les he explicado acaso que en mi universo su velocidad está limitada a un metro por segundo? ¿Son ustedes sordos o qué?

–¿Pretende decirnos que vamos a tardar 10^{426} años en salir de aquí? —la voz de Kink adquirió al final una inflexión ronca.

–Exactamente.

–¡Pero... pero nos quedaremos sin combustible mucho antes!

–Mi capitán, lo que ocurrirá mucho antes es que todos estaremos muertos —señaló Pock tranquilamente.

–¡Ay, ay, ay! ¡Y encima eso!

–Siempre se me olvida que son ustedes criaturas orgánicas. ¡A mí el tiempo me importa tan poco...! Bueno, voy a sumergir su nave en un campo que hará inagotable sus reservas de combustible y les evitará toda modificación corporal.

La Voz Desencarnada desapareció.

–Bueno —dijo Kink con dificultad—. Y ¿qué hacer para pasar 10^{426} años? ¿Ver en vídeo la historia completa de la humanidad? ¿Sumar todos los números de todas las guías telefónicas de la Tierra? No, todo eso nos llevaría demasiado poco en comparación con el tiempo total que hemos de pasar. Vamos a tener un viaje aburrido, un periplo inmensamente fastidioso, terriblemente monótono...

–Eres inmortal, aburrimiento, cuando en el hombre haces presa... —empezó Latazo.

–¡Tengo una idea! —exclamó Dott.

Se volvió hacia el médico de a bordo.

–Dr. Latazo, ¿por qué no nos regala usted con sus aventuras de cuando era tercer oficial médico a bordo del *Indefendible*? A lo mejor, ahora sí puede acabar de contarlas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CONCRETE MATHEMATICS. Ronald L. Graham, Donald E. Knuth y Oren Patashik, Addison-Wesley, Reading MA 1989.

Libros

L. Garzón, J. González Gallego, L. Alonso y J. M. García de la Mora

Nuevos materiales

Compilación española

INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA DE MATERIALES. Dirigido por J. M. Abella, A. M. Cintas, T. Miranda y J. M. Serratosa. C.S.I.C.; Madrid, 1993.

Dentro del abigarrado universo de objetos de nuestro entorno ocupan una posición especial los que se han llamado nuevos materiales, entre los que, sin pretender agotar el repertorio, se encuentran los siguientes: superconductores de alta temperatura, polímeros conductores, aleaciones metálicas de elevada resistencia térmica y mecánica, imanes fabricados con lantánidos, cerámicas tenaces, materiales híbridos (composites), semiconductores y los fullerenos, por citar algunos de los más recientes.

La descripción científica, y por tanto coherente, de este universo es competencia, en general, de la ciencia química (química-física) y, en particular, de una de sus ramas más recientes y vigorosas: la ciencia y tecnología de materiales. Esa descripción significa que, a partir del conocimiento de la estructura de los materiales, se pueden explicar racionalmente, e incluso predecir, las características (propiedades) de cualquier material, así como los diversos *modus facendi* ("know how") para su fabricación.

La estructura de cualquier material presenta diferentes niveles según la escala (resolución) que se considere. Yendo desde la subatómica a la macroscópica, nos encontramos con los siguientes bloques estructurales: núcleos, electrones, átomos, moléculas, microagregados, redes, granos, microestructuras y material microscópico. Además de la estructura, los materiales poseen propiedades que se pueden considerar respuestas características a la aplicación de determinados estímulos.

El libro que comentamos consta de 15 capítulos agrupados en dos partes: aspectos básicos y técnicas de caracterización, con 10 y 5 capítulos respectivamente. Tras exponer las ideas fundamentales sobre estructura atómica y enlace químico, se examinan los tipos de materiales. A la termodinámica y equilibrio se dedican dos capítulos; uno, a los fenómenos de superficie; propiedades mecánicas, magnéticas, eléctricas y ópticas reciben también un extenso tratamiento independiente.

La segunda parte recoge las técnicas de preparación y caracterización de los materiales. Comienza con la descripción de los equipos básicos: obtención y medida del vacío, ídem de bajas temperaturas, ensayos termomecánicos, medidas eléctricas, magnéticas y ópticas. Sigue un capítulo dedicado a la preparación de cristales, tanto en volumen como en películas delgadas. A continuación se abordan las técnicas de la utilización de los rayos X; las microscopías más importantes (óptica, electrónica y de efecto túnel), análisis por absorción y emisión atómica, cromatografía, termogravimetría, espectroscopias, desde la infrarroja a la resonancia magnética nuclear, y, finalmente, análisis de superficies y películas delgadas.

Sin duda el libro representa un esfuerzo de recopilación, lo cual es de agradecer, sobre todo cuando es el primer intento general que se hace en España en este campo del conocimiento de los materiales. Decimos general porque conviene señalar que en nuestro idioma existen publicaciones que, tanto por sus contenidos como por sus objetivos, pertenecen al mismo género científico. Como ejemplos a recordar citaremos los siguientes: Garrido y Orland, *Los rayos X y la estructura fina de los cristales*; Berl-Lunge-D'Ans, *Métodos de Análisis Químico Industrial*; así como el número monográfico de *Investigación y Ciencia* "Materiales para el desarrollo económico", de diciembre de 1986.

Hubiéramos preferido que los fundamentos de la estructura de la materia se hubiesen desarrollado siguiendo el método sintético, y no el histórico, que suele ser menos económico, es decir más farragoso que aquél. La adopción de enfoques clásicos (macroscópicos) y estructurales (microscópicos) que, con pocas excepciones, se advierte a lo largo de toda la primera parte del libro, hace que se pierda la unidad que se hubiera alcanzado adoptando una metodología estructuralista. Además, el libro hubiera resultado más atractivo. Se deja sentir la ausencia de algunas aplicaciones de las magnitudes termodinámicas, a pesar de que no se escatiman tablas de los valores correspondientes. Resulta sorprendente que se haya dedicado tan poco espacio al estudio de los materiales híbridos, así como a su fabricación.

La obra se halla a medio camino entre un libro de texto y uno de consulta, por lo que, en principio, participaría de las características de ambos. Como libro de texto podría utilizarse preferentemente en las Escuelas Técnicas y como libro de consulta sería útil para las personas relacionadas profesionalmente con la ciencia de los materiales. Obviamente, sus 750 páginas no agotan todo el campo actual de la ciencia de los materiales, a pesar de lo cual presenta un claro interés general que se acrecienta cuando se tienen en cuenta las referencias bibliográficas que aparecen al final de cada capítulo. (L. G.)

Orientación animal

Ecolocalización

THE SONAR OF DOLPHINS, por Whitlow W. L. Au. Springer-Verlag; Berlín-Nueva York, 1993.

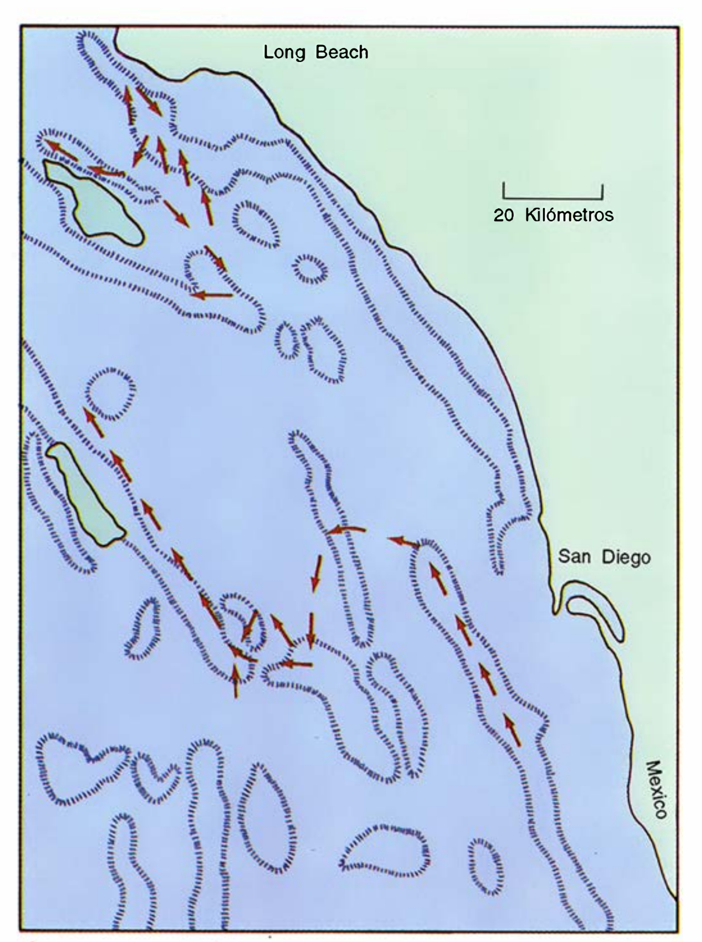
Desde hace siglos los seres humanos han sentido una especial fascinación por los delfines. Dicho interés se ha acentuado a partir de la década de los cincuenta, debido a la proliferación de espectáculos protagonizados en delfinarios y oceanarios y a la aparición de series televisivas que han contribuido a crear el mito de que algunos mamíferos marinos tienen una inteligencia similar a la humana. Tales planteamien-

tos, sinceros, pero evidentemente infundados, suponen un obstáculo para el desarrollo de investigaciones serias que permitan un mejor conocimiento de la morfología, fisiología, psicología y capacidades sensoriales de los delfines.

El libro que nos ocupa se centra en una de dichas capacidades sensoriales, el sonar. El término sonar se acuñó a finales de la segunda guerra mundial como un acrónimo de *So*und *Na*vigation and *R*anging. Originalmente se refería a la detección y localización de objetos submarinos, tales como minas, mediante la proyección de sonidos y la detección de los ecos producidos al reflejarse aquéllos. Otro término, el de ecolocalización, se aplicó en principio a la orientación de los animales basada en la emisión de pulsos ultrasónicos y la recepción de los ecos producidos por objetos. Hoy día, los términos sonar, ecolocalización y biosonar o sonar biológico se utilizan indistintamente para referirse al concepto de detección, localización, discriminación, reconocimiento y orientación o navegación en animales capaces de emitir energía acústica y recibir ecos.

El descubrimiento de que algunos animales son capaces de utilizar la ecolocalización se debe al naturalista Lazaro Spallanzani, quien, a finales del siglo XVIII, demostró que unos murciélagos ciegos eran capaces de encontrar sin dificultades su camino al campanario donde habitaban en la catedral de Pavía, o de capturar con facilidad insectos. Spallanzani llegó a la conclusión errónea de que los ecos detectados por los murciélagos procedían de sonidos originados por el batir de sus propias alas o de las de los insectos capturados. Tuvo que pasar un siglo y medio hasta que Donald Griffin demostrara en 1938, detectando las señales que emitían estos animales mediante un micrófono de cristal piezoeléctrico, que los murciélagos producen gritos ultrasónicos para orientarse en la oscuridad. Hoy día sabemos que la ecolocalización es un fenómeno desarrollado en grado elevado entre los murciélagos quirópteros y en ciertos cetáceos, principalmente marsopas y delfines, y que también puede estar presente en algunas aves.

La capacidad de los delfines para localizar sonidos mediante el sonar ha intrigado a los científicos desde su descripción inicial por Arthur McBride en 1947. El sonar de los delfines es un mecanismo extremadamente sensible, resultado de millones de años de evolución, y superior al sonar de fabricación humana en su capacidad para el reconocimiento y clasificación de objetos.



El seguimiento por radiotransmisores incorporados en los delfines pone de manifiesto que se guían por sus sistemas de ecolocalización. Las flechas en rojo indican la ruta de los delfines; las figuras delimitadas por rayitas azules, escarpes submarinos

Las investigaciones en el campo del biosonar han requerido siempre una aproximación multidisciplinar, aunando los enfoques de científicos procedentes de campos tan diversos como la biología, psicología, física, ingeniería o medicina veterinaria. La naturaleza compleja del tema hace que la elaboración de un manual técnico sobre el sonar de los delfines, que pueda ser asequible para una amplia audiencia, resulte verdaderamente difícil. Consciente de dicha limitación, el autor comienza el texto mediante un capítulo introductorio en el que se presenta una serie de conceptos fundamentales y necesarios para la comprensión ulterior del libro. Se inicia mediante una breve historia acerca de las investigaciones sobre el biosonar y, a continuación, se incluyen secciones sobre acústica submarina, análisis de Fourier, psicofísica y teoría de detección de señales. Aunque ciertamente estos conceptos introductorios pueden ayudar a comprender mejor la naturaleza estadística de la percepción auditiva o determinadas nociones relacionadas con los sistemas de transmisión, creemos que el autor no ha conseguido vencer en su totalidad la limitación inicial. No suponiendo necesariamente un defecto, dado lo arduo de la tarea de síntesis y unificación, el estudio del texto requiere una formación físico-matemática de la que habitualmente carecen los profesionales de las ciencias biológicas.

El libro se estructura en una serie de capítulos que cubren las características de los sistemas de recepción y transmisión, capacidades de detección y discriminación y procesamiento de señales. Los capítulos dos a cuatro se ocupan del sistema receptor: componentes del sistema auditivo, características psicofísicas del sistema receptor (sensibilidad a tonos discretos o continuos, análisis espectrales y audición direccional) y recepción de señales complejas. Se abordan, en los dos siguientes, las características del sistema de transmisión del sonido, para pasar luego a describir el subsistema de procesamiento de señales.

Tras comparar las características de los sistemas de sonar de los delfines y de los murciélagos, el libro se cierra con un repaso a las áreas en las que se requiere una profundización adicional y un desarrollo de investigaciones que nos permitan

progresar en nuestro conocimiento acerca del sistema de ecolocalización. El texto se acompaña de un excelente material gráfico y de una bibliografía detallada y actualizada, completándose algunos capítulos con apéndices que facilitan la comprensión de ciertos conceptos. (J. G. G.)

Ciencia y arte

Sin palabras

NON-VERBAL COMMUNICATION IN SCIENCE PRIOR TO 1900. Dirigido por Renato G. Mazzolini. Leo S. Olschki Editore; Florencia, 1993.

MEDICINE AND THE FIVE SENSES. Dirigido por W. F. Bynum y Roy Porter. Cambridge University Press; Cambridge, 1993.

IMAGES OF SCIENCE. A HISTORY OF SCIENTIFIC ILLUSTRATION, por Brian J. Ford. The British Library; Londres, 1992.

THE FABRIC OF THE BODY. EUROPEAN TRADITIONS OF ANATOMICAL ILLUSTRATION, por K. B. Roberts y J. D. W. Tomlinson. Clarendon-Oxford University Press; Oxford, 1992.

LEONARDO DA VINCI ON PLANTS AND GARDENS, por William A. Emboden. Dioscorides Press; Portland, 1987.

Todo conocimiento nos viene a través del lenguaje. Pero éste no tiene por qué ser oral o escrito. En muchas ocasiones, un instrumento, un modelo o un dibujo encierran un contenido informativo muy superior al que puedan ofrecernos mil páginas sobre el mismo asunto. El anillo bencénico, el armazón planetario del Euratom de Bruselas o la doble hélice del ADN señalada por Francis Crick con un puntero en una fotografía archifamosa han allanado mucho más el camino, en distintos niveles de comprensión, que los trabajos escritos donde se dieron cuenta de esos hitos de la historia de la ciencia. El propio cuidado que la revista que tiene el lector delante presta a las ilustraciones no esconde otra finalidad que mostrar la cosa en sí, facilitándole el entendimiento de los textos.

De un tiempo a esta parte, comienza a abrirse paso en la bibliografía una serie de libros dedicados a las distintas fuentes de información científica no verbales. Con los instrumentos, modelos y esbozos gráficos, se consideran tales las colecciones clasificadas (de minerales, de cortes histológicos, de cráneos y herbarios), instituciones (museos de historia natural, laboratorios, teatros anatómicos, boticas, minas y observatorios) y representaciones convencionales, verbigracia, la tabla de Mendeleev.

Las obras que se reseñan no parecen ocupar lugares secundarios. Puede servirnos de marco general, por los temas que abarca y el período estudiado, *Non-verbal communication in science prior to 1900*, dirigido por Renato G. Mazzolini y encuadrado en la "Biblioteca Nuncius" del Instituto y Museo de Historia de la Ciencia de Florencia. A modo de ejemplo paradigmático, recuerda Mazzolini lo que ocurrió con cierto grabado en cobre realizado por Johann Georg Wirsüng en 1642, que ilustra el páncreas y el conducto pancreático. Sacó impresas varias láminas que envió a los principales anatomistas de su tiempo; tal fue su influjo, que el número de estudios sobre la glándula creció exponencialmente, con la incursión de Sylvius, de Graf, Bartholin, Pechlin y Brunner, entre otros.

Wesley M. Stevens inicia el apartado medieval con un estudio sobre el papel desempeñado por signos y símbolos en la ciencia carolingia, introduciéndonos en los *scriptoria* monásticos que salvan, en situaciones precarias, la cultura grecorromana, apuntan las irregularidades de las estrellas errantes, esbozan los epiciclos de los planetas y cartografían los continentes conocidos. David A. King pasa revista a la historia de la astronomía en distintas regiones europeas a través del examen pormenorizado de los astrolabios, desde el bizantino de Brescia del siglo XI, que porta inscripciones en griego, hasta uno francés del XIV, que trae la primera numeración de escalas y latitudes, pasando por el disputado astrolabio español de Cataluña, del siglo décimo, una auténtica "insalata mista" de culturas y tradiciones científicas. Con la técnica aplicada en España, y en particular con el sifón invertido del acueducto romano de Toledo, tiene que ver también la aportación de Paolo Galluzi sobre los dibujos de las máquinas en la Siena del Quattrocento. Se centra en *De ingeneis* y *De machinis* de Tacola, cuya función explicativa corresponde, por modo casi exclusivo, a las láminas.

La evolución de los símbolos y diagramas matemáticos en los siglos en torno a la revolución científica se superpone a la difusión del sistema de numeración árabe, la impresión y glosa de los textos matemáticos de la antigüedad, el florecimiento del álgebra y el desarrollo de los logaritmos, la geometría analítica y el cálculo infinitesimal. Hasta que no se establecieron comités internacionales de normalización, cumplió a los impresores buscar unas pautas de economía y generalidad que facilitaron enormemente la comprensión de los nuevos conceptos. Lo estudia aquí Robin E. Rider, y lo prolongan Willem D. Hackmann y John J. Roche hasta el siglo XIX y la filosofía natural (física). El experimento que se ilustra añade espectacularidad a la confirmación teórica, como los trabajos de Robert Hooke o la bomba de aire de Guericke. Los gráficos, por su lado, sirven para abstraer de lo particular: cuando se dibujan en geometría líneas de rayos ópticos se quieren mostrar trayectorias ideales, cuyo significado físico se deja momentáneamente de lado.

Corre paralelo a la abstracción y algebrización de la física el proceso de simbolización en química. En el último tercio del XVII, Nicolas Lemery rompe con el esoterismo alquímico, pero no son fáciles de manejar todavía sus "plus communs caractères chymiques", ni acaban de satisfacer los códigos que le irán sucediendo. Se buscaba, sobre todo, y con razón, hacer plástica la afinidad entre las sustancias, aspecto en que se esforzaron Bergman y Black en el XVIII. La solución, incoada por Lavoisier, vendría en la centuria siguiente, instada por el desarrollo interno de la química.

Para cuando llegaron el daguerrotipo y otras técnicas fotográficas a la medicina, punto casi final de la obra, el arte de preservar la salud o restaurarla en su defecto llevaba veinticinco siglos de maridaje con los sentidos, manteniendo al propio tiempo relaciones infieles con los textos escritos. De eso se trata en *Medicine and the five senses*, que agavilla catorce ponencias dictadas en un simpósium monográfico celebrado en el Instituto Wellcome de Historia de la Medicina y unidas por un máximo común divisor cifrado en dos preguntas: ¿qué orden de jerarquía presentan, en razón de su nobleza y en razón de su necesidad, los sentidos? y ¿de qué modo las facultades mentales confieren coherencia a la materia bruta que le suministran los sentidos?

La conferencia de Vivian Nutton, autoridad en medicina clásica, pre-



Lámina coloreada a mano de la Astronomiae instauratae mechanica, *de Tycho Brahe, de 1598. La figura central sedente es un retrato de Brahe a sus cuarenta años*

senta a Galeno como el maestro que, por encima de Hipócrates, le saca partido al hábil empleo de la sensibilidad en su quíntuple forma. El conocimiento que se extrae de la cabecera del enfermo no es de inferencia apodíctica, sino conjetural, peculiar de los sentidos. En el diagnóstico galénico no importa demasiado el olfato, exigido para percibir el olor que despiden la orina, el esputo, las heces o las ulceraciones del paciente; algo mayor crédito debe concederse al gusto —los sabores responden a la naturaleza de las cosas, especie morbosa incluida, en la filosofía natural aristotélica—. El oído no es sólo auscultación de los sonidos internos, sino, sobre todo, receptor de las explicaciones, y de la voz, del enfermo. Triple es la función del tacto en el quehacer clínico: tomar el pulso, medir la temperatura y palpar el cuerpo; operaciones que unas veces deben realizarlas los dedos y otras la palma abierta. El sentido principal será, desde siempre, el de la vista, que permite, además, adivinar el curso, o pronóstico, del enfermo. En ninguna otra rama del saber clásico adquiere pareja importancia la sensibilidad.

Para ejemplificar la tesis del libro en la Edad Media, Elizabeth Sears ha tomado una vereda ingeniosa, el análisis contextual de una imagen del *Bestiaire d'amours* de Richard de Fournival, en un manuscrito de 1285. La pintura ilustra la casa de la memoria, en la que se entra por el doble portón de la vista y el oído. La metáfora le da pie para sondear en los anaqueles del autor y reconstruir el significado de la misma a través de los libros reunidos. Del Aristóteles recién recuperado para la cultura occidental extrae la doctrina psicológica del *De anima* y la teoría de la sensibilidad de los *Parva naturalia*: todo lo que la naturaleza realiza lo realiza por un fin, y así los sentidos externos están donde están (cerca del cerebro) para recibir las impresiones, unas específicas otras comunes, que habrán de transmitir a otros sentidos internos, sobre cuya información actuarán las facultades superiores. Ese significado vehicular, respaldado por Galeno y Cicerón, tiene su expresión arquitectónica en las puertas mencionadas.

Idéntico patrón —seleccionar un autor que epitomice una época— sigue Jerome Bylebyl al presentarnos los comienzos de la enseñanza clínica en los discursos hospitalarios de Giovanni Battista da Monte. Este restaurador del galenismo ayuda a ver en el lecho del enfermo los síntomas enumerados y jerarquizados en las aulas. La observación cumple el doble cometido de ser punto de par-

tida para el diagnóstico, que no es más que un resumen general de las apariencias y de lo que se infiere existe detrás de ellas, y banco de contrastación de lo aprendido. Se percibe aquello para lo que se está preparado ver.

Estrechamente ligado con la medicina ambiental hipocrática, el olfato gozó de una amplia bibliografía hasta el Renacimiento, resumida por Richard Palmer en sus puntos cruciales, y que son dos: dónde reside el órgano del olfato (en el cerebro, se responderá) y en qué consiste la naturaleza del olor, vale decir, si se trata de una cualidad o de una realidad material. Predominó la idea de tomarlo por una entidad real, pues los malos olores producían enfermedades, de carácter epidémico sobre todo. Con los siglos se fue vinculando la perfumería a la higiene, o medicina preventiva, y se creó un comercio próspero de aceites esenciales volátiles.

A propósito de la vista, la fisiognomía prentendió, como ninguna otra corriente, unir arte y medicina. Más que un sistema, era una práctica, de escasa incidencia clínica sin embargo, como se ha encargado aquí Ludmilla Jordanova de mostrar rescatando material de su disertación de doctorado. No resultaba fácil acotar su naturaleza —¿cómo distinguir una presencia de ánimo transitoria de un talante permanente?—, ni su extensión —¿podría aplicarse a los animales y a las plantas?—. Abarca el período de máximo esplendor, de 1780 a 1820, a través de la comparación entre la descripción que dan Richard Brown y François Cabuchet, aquél insistiendo en líneas, ángulos y tamaño cerebral, y éste en la anatomía comparada, para explicar uno y otro las variaciones de temperamentos, esto es, entre linfáticos, biliosos y melancólicos.

Contemporáneamente fue adquiriendo mayor peso en clínica la auscultación. La percusión torácica y, en particular, el estetoscopio de Laënnec, luego de romper resistencias iniciales, estudiadas aquí en Edimburgo, se transformaron en poderosa arma discriminante de las patologías internas. Mas, para ello, había que educar el oído, los sentidos en general; es éste el campo desarrollado, entre otros firmantes, por Roy Porter y Merriley Borell.

El tránsito de la teoría de la relación entre arte y ciencia a la ejemplificación plástica nos lo ofrece Brian J. Ford en *Images of Science. A History of Scientific Illustration.* Aunque no está exento de razonamientos y explicaciones, prima la sucesión de imágenes en un alarde iconográfico lujoso.

Podemos percibir hasta qué punto, en la historia del saber, la ilustración dignifica el texto, desempeña una función didáctica y da cuenta del estado de la ciencia en un momento determinado. A veces, el mensaje es el propio medio, como en los pigmentos de las cuevas saharianas neolíticas donde el rojo se conseguía con hematites, el amarillo con ocre de hierro, el blanco con óxido de cinc y el negro con carbón vegetal. La ilustración tiene su propio desarrollo interno, desde la estilización e idealización hasta el realismo de la escena en su integridad; esa línea ascendente la poseen también los avances técnicos del soporte, desde la piedra, la arcilla o el cuero de los códices hasta los grabados renacentistas.

No se levantará a Ford una estatua en el panteón de Fama con los textos de los ocho capítulos en que divide su álbum. Tomemos al azar el quinto, sobre el mundo inerte. Inicia el apartado con las matemáticas, pero muy pronto entran en escena Gilbert y el magnetismo, y apenas ha hilvanado dos generalidades sobre la electricidad dirige la mirada hacia la geología y la química. Batiburrillo que resulta menos justificado cuando habla en otro capítulo de la astronomía (lugar obvio de la matemática durante milenios) y en otro más de la geografía (donde hallaría mejor acomodo la geología). Tampoco es de recibo que, mostrándose crítico con varios autores, sitúe Altamira en el País Vasco, haga ateniense a Alejandro Magno y "corrija" errores inexistentes en el original (p. 97).

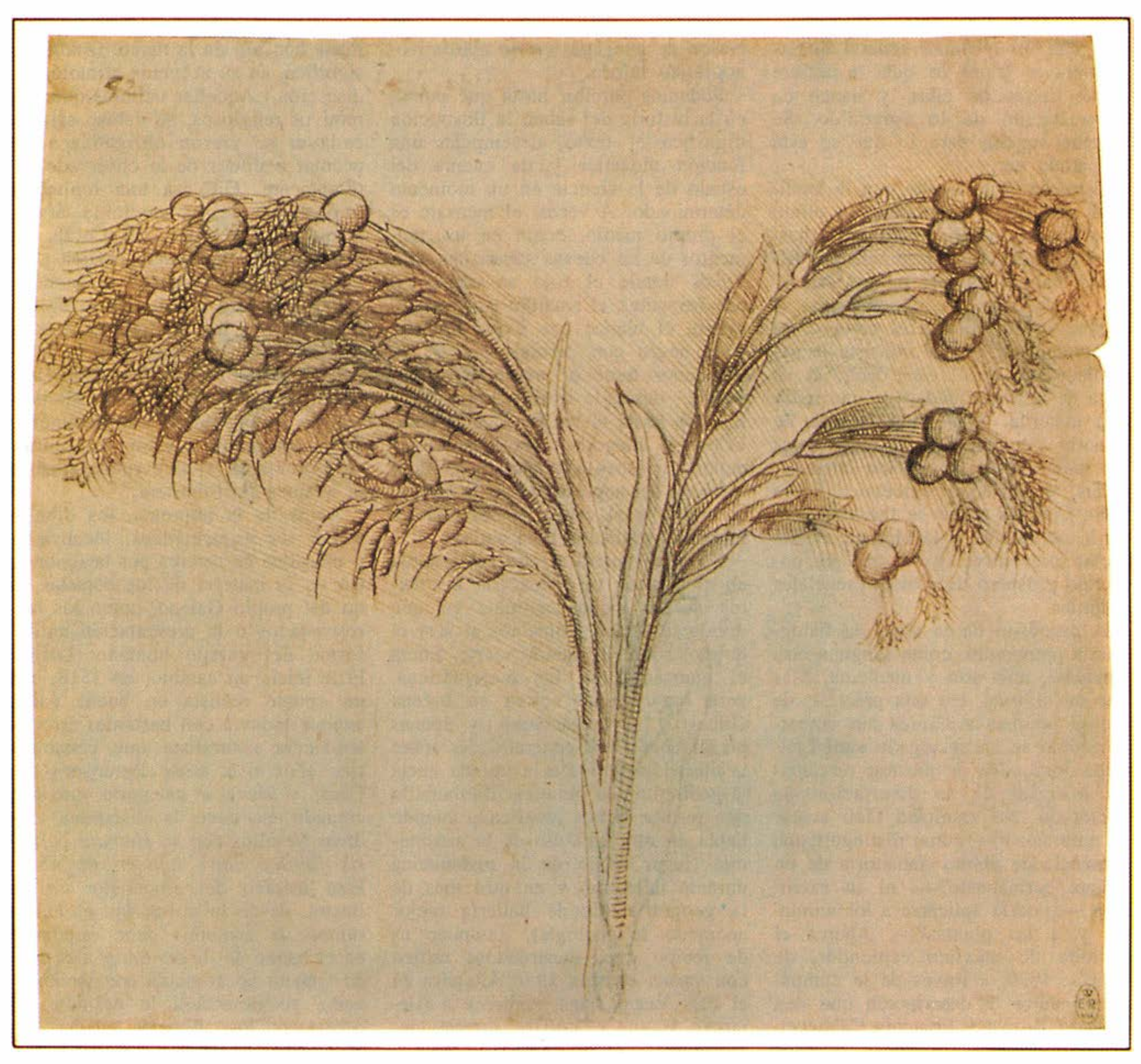
Si hemos de desviar la atención de una vista panorámica a una estampa regional vale la pena hacerlo con *The Fabric of the Body. European Traditions of Anatomical Illustration*, de K. B. Roberts y J. D. W. Tomlison. Aquí el texto, sea el de las introducciones a los distintos capítulos sea el de las explicaciones de la imágenes anatómicas, se mueve entre el rigor y la amenidad de una erudición oportuna. Cubre esta antología la ilustración anatómica desde la Edad Media hasta nuestros días. En una suerte de proceder anatómico-recursivo, se diseca al autor cuyas láminas se traen a contemplación, su tiempo y su lugar. Por lo que el lector tiene, sin casi advertirlo, varios libros en uno: desarrollo de la disciplina (anatomía normal), historia de sus principales cultivadores, historia del arte e historia de la impresión (grabado y litografía).

Anatomía interna y disección humana han ido de la mano. (*Anatomía* significa, en su acepción etimológica, disección.) Aquellas culturas que, por motivos religiosos, no debían sajar el cadáver se vieron obligadas a especular o inferir de lo observado externamente. Fue ésa una limitación importante de la medicina árabe, atenida a las reglas del Corán. Lo fue también de Galeno, quien sólo abrió animales (cerdos y monos), con los errores consiguientes de extrapolación a los sujetos humanos, y así nubló, hasta cierto punto, el esplendor de los anatomistas alejandrinos del siglo III antes de Cristo. Momento éste parangonable a la decimotercera centuria de nuestra era, cuando en Bolonia se vuelve rutinariamente al examen post-mortem.

Antes de la imprenta, los dibujos solían ser esquemáticos, idealizados y plagados de errores por la ignorancia en la materia de los copistas, si no del propio Galeno, como los úteros astados o la presentación anfibiforme del cuerpo humano. Lorenz Fritz inicia un cambio, en 1518, con un apunte realista en buena parte, aunque todavía con bastantes errores, tendencia naturalista que consolida tres años más tarde Berengario de Carpi y eleva a categoría máxima, creando ex novo la disciplina Andreas Vesalius con su *Humani corporis fabrica libri septem*, de 1543. Este médico del emperador Carlos ilustra, desde la portadilla, el nuevo rumbo: la anatomía debe estudiarse en el banco de disección, y allá donde Galeno no coincida con lo observado, se desechará la opinión del pergameo; los animales quedan, en el cuadro, apartados del anfiteatro. Las ilustraciones espejan la fuerza de los dibujos renacentistas y la pulcritud del manierismo; nunca son naturaleza muerta.

En efecto, la evolución de las láminas de anatomía secunda la de los estilos artísticos. Hay una anatomía del barroco, en la que el entorno participa en la interpretación de la víscera representada, como existe una anatomía neoclásica en la que se podría inscribir nuestro Crisóstomo Martínez, cuya obra se esboza aquí a partir de la recuperación de López Piñero.

Tras un detenido repaso por las escuelas nacionales (moroso en el caso inglés), con especial simpatía por la holandesa y la figura de Fredrik Ruysch, quien aplica la inyección de líquidos para seguir el movimiento de los fluidos internos y dibujar así mejor su curso y ramificación, los autores coronan su tarea



Coix lachryma-jobi, *planta de reciente introducción en Europa cuando Leonardo realizó a plumilla este dibujo. Se la relaciona con los estudios de arquivoltas en su arquitectura*

con dos capítulos dedicados a los métodos que nos son más cercanos en el tiempo. La litografía permite, con un conocimiento de la gama de colores y su oportuna mezcla, sacarle mayor partido a la reproducción. Es la época dorada de los atlas, en particular el de Eduard Pernkopf.

La ciencia se convierte en arte en la mente y la mano de Leonardo da Vinci. Los libros precedentes se ocupan en variada extensión de determinados aspectos del renacentista nacido en 1452. Ninguno, sin embargo, supera la profundidad de William A. Emboden en *Leonardo da Vinci on plants and gardens.* La iconografía botánica goza de una larguísima historia, pero adquiere verosimilitud técnica en este retratista de las flores, que libera la planta de su enclaustramiento médico para convertirla en objeto estético de estudio.

Con el descubrimiento del códice de Madrid y su publicación en 1968 apareció un Leonardo conocedor de las corrientes científicas del humanismo a través de sus obras principales. Muchas de ellas eran botánicas. Pero no se refugiará en su dictamen, sino que acude a la experiencia, según revelan sus manuscritos, donde expone la necesidad de conocer la embriología y la anatomía para poder ilustrar dinámicamente luego su morfología externa. Escribe sobre filotaxis, o crecimiento ordenado de las hojas, el ascenso de la savia, el anillo de los árboles y el funículo. Aprovecha esa experiencia directa para dibujar, por analogía, la estructura de los órganos animales, el engranaje de las máquinas de guerra o sus creaciones escultóricas y arquitectónicas.

En los varios álbumes comentados (colección de la Biblioteca Real de Windsor, iglesias y pinacotecas) que componen el trabajo de Emboden, el lector comprueba la imbricación de la simbología del cuadro y la perfecta delineación de la planta. Sea, por ejemplo, la *Madonna del fiore.* Los manuales de arte resumen la escena, tras evocar la ternura materna y el significado religioso del cuadro, con las palabras siguientes: "La Virgen sostiene un jazmín entre las manos del Niño". Pero el botánico ve otra cosa, y otro simbolismo por tanto; el

jazmín tiene cinco pétalos, mientras que Leonardo ha pintado una crucífera, emblema de la crucifixión; la seriedad del Infante lo avala.

Leonardo da Vinci, que no balbuceó el latín hasta los treinta años y no parece que jamás conociera el griego, queda, por un lado, al margen de las corrientes depuradoras de los textos científicos clásicos, pero, por otro, encarna, mejor que ningún filólogo, la investigación directa de la naturaleza según comenzaban a desear los botánicos europeos de su tiempo y se hará realidad algunos años después. (L. A.)

Ciencia y filosofía

Cuestión de lenguaje

LESSICO FILOSOFICO DEI SECOLI XVII E XVIII: A-AETHERIUS. Dirigido por Marta Fattori y Massimo Luigi Bianchi. Edizioni dell Ateneo; Roma, 1992.

Para dilucidar la terminología filosófica de unos siglos que fueron clave en la gestación de la ciencia y la mentalidad modernas, el Centro di Studio, del italiano Consiglio Nazionale delle Ricerche per il Lessico Intellettuale Europeo (LIE), ha contado con la colaboración del Instituto Warburg de la Universidad de Londres. Según hace notar Tullio Gregory en la presentación, se publica primero la *Sección latina* del *Léxico* por la importancia que tienen los textos latinos en la producción filosófica y científica y por su influjo en la constitución de la terminología técnica de las lenguas nacionales europeas.

Como el estudio de las humanidades clásicas anda hoy en España menospreciado y preterido, serán muy contados quienes, aun interesándose por la historia de la filosofía y la ciencia, consigan beneficiarse del rico venero de informaciones contenido en estas páginas. Informaciones consistentes sobre todo en matices, afinidades, cruzamientos y derivas de carácter semántico y contextual. Pues, a diferencia de lo que suelen ofrecer los léxicos, vocabularios o diccionarios al uso, en ninguna de las voces aquí elencadas se nos dan directamente los significados y las distintas acepciones, sino que únicamente se nos brindan pasajes de los textos latinos, seleccionados y dispuestos por orden cronológico, en los que aparece, idéntica o diferentemente empleada, la voz en cuestión.

Acerca de esta y otras directrices del trabajo ilustra la introducción, donde, tras exponerse la génesis y la historia del *Lessico*, se detallan las características de esta *Sezione latina* y se ofrece el instrumental que es de rigor: nota bibliográfica, lista y datos cronológicos de los autores citados e índices y siglas de las fuentes utilizadas. La incorporación a éstas de los dos Lexicones (1613 y 1615) de Göckel o *Goclenius* y los de Micraelius (1662) y Chauvin (1713) la consideramos muy oportuna.

Más criticable es la selección de algunas de las fuentes. Cuando se nos pide que al recorrer el índice de las fuentes tengamos en cuenta que "la mayor parte de las obras provienen de un 'papeleteo' (*schedatura*) manual", que "algunas, como el *Novum Organum* de Bacon, la *Aesthetica* y las *Meditationes philosophicae* de Baumgarten y la *Ethica ordine geometrico demonstrata* de Spinoza,



Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716), buen conocedor del español Suárez, constituye un caso arquetípico de dominio de la filosofía y la ciencia de su tiempo

provienen de una elaboración no selectiva realizada con ordenador" y que "finalmente, otras, como las de Wolff, han sido fichadas a partir de los índices, copiosísimos, elaborados por el propio autor y que remiten a los parágrafos", nos ronda la sospecha de si los editores no se habrán atenido también, para elegir determinados autores y textos, a la practicidad de lo que les resultaba más disponible. Otra sospecha aneja es la relativa a los consabidos *chauvinismes*. ¿Por qué a la hora del "individuare opere significative di filosofi e scienziati, appartenenti alle sei aree linguistiche ritenute privilegiate: tedesco, francese, inglese, italiano, spagnolo e latino" y cuando, por tratarse aquí precisamente de la última, el área latina, podría haberse paliado lo enojoso de ese "privilegiate" y, con miras más ampliamente europeístas, haberse incluido a destacados autores, por ejemplo portugueses —que también los hubo que escribieron, y en excelente latín, "opere significative"—, por qué apenas se hace nada de ello? No parece admisible la omisión de un Francisco Suárez, cuyas *Disputationes Metaphysicae* y cuyos tratados jurídico-políticos fueron estudiados en las universidades europeas, y se incluya, en cambio, Henri More, de controvertido influjo en Newton e indisputada mente neoplatonizante, más propia del Renacimiento que del siglo XVII.

Españoles cuyos escritos neolatinos cabría haber considerado para estudiar el léxico filosófico-científico de aquellos siglos son con pleno derecho Juan Caramuel, de cuya *Mathesis audax* o de cuya *Rationalis et realis Philosophia fundamentis substruens exponensque* se habrían extraído excelentes frutos; o Tomás Vicente Tosca.

Dentro de otras "aree", no hubiese estado de más introducir, por ejemplo, la *Philosophiae Naturalis Theoria reducta ad unicam legem virium in natura existentium* del ragusano Roudjer Yossif Boscovich, matemático, óptico y astrónomo que en filosofía siguió orientaciones de Locke combinándolas con otras de Newton y de Leibniz. Por último, de los diversos estudios que en sus bases y conexiones filosóficas no tienen ninguna representación en estas "fuentes" quizá sea el de la historia de la filosofía el que más se echa de menos. Juan Francisco Buddeus con sus *Analecta historiae philosophiae* (1706), Juan Jacobo Brucker con su *Historia critica philosophiae* (1742-44) o Daniel Jorge Morhof con el *Polyhistor litterarius, philosophicus et practicus* (1732) habrían servido, sin duda, de muy enriquecedoras fuentes léxicas y conceptuales.

En la redacción del cuerpo de la obra, además de lo muy esmerado de las transcripciones, la exactitud de las referencias y la claridad de la presentación, se ha conseguido un equilibrio en el reparto de las proporciones o extensión que se da a cada voz según su importancia respectiva. (J.-M. G. M.)

Anne Eisenberg

La eponimia en la ciencia

El buckminsterfullereno (C_{60}) es un alótropo del carbono con la simetría del cuero de un balón de fútbol. Y es también un epónimo, o sea, una palabra o frase que, como "test de Turing", "mechero de Bunsen", "galvanizar" o "dalia", se derivan del nombre de una persona o de un lugar. En el caso de este carbono alotrópico, la fuente de su denominación es R. Buckminster Fuller, inventor de las cúpulas geodésicas, de estrecho parecido con la estructura molecular del C_{60}.

Muchos científicos no ven con agrado los epónimos y prefieren frases descriptivas, informativas. Uno de ellos era Richard Feynman, lo que no ha obstado para que tengamos diagramas de Feynman, teorema de Feynman-Hellmann y hasta representación de Feynman-Vernon-Hellwarth. Los comités de nomenclatura son también enemigos de los epónimos. Encargados de introducir lógica en la terminología de sus campos, suelen rechazar los términos epónimos por considerarlos caprichosos, inexactos, arcaicos y, a la postre, personalistas. Pero no hay resistencia que pueda frenar la entrada a raudales de epónimos, y ahí están, frescos y salpicados con un pellizco de humor, avivando la prosa insulsa de la ciencia.

En astronomía, a los cometas se les pone inmediata y automáticamente el nombre de la persona que primero los observó. En otras muchas áreas, sin embargo, los científicos han de llevar primeramente a cabo su trabajo y esperar después a que algunos colegas amigos se cuiden de honorificarles.

Los descubridores que quieren coronarse han de recurrir a algún artificio. Lillian M. y Frank B. Gilbreth, creadores de un bufete de asesoramiento en ingeniería, necesitaron una nueva unidad de medida para dar cuenta de trabajos tales como el coger o el buscar repetidamente un objeto. Los Gilbreth decidieron crear, para gloria propia, esta unidad. Sin duda, muchas unidades de medida son epónimos —joule, watt, ohm, ampère, coulomb, farad, franklin y curie, entre mil más—, pero, por regla general, las unidades son denominadas *para* los científicos, no *por* ellos. Los Gilbreth llamaron a su unidad de medida, todavía hoy en uso, el "therblig" —Gilbreth disfrazado— y así ocultaron modestamente su origen.

Samuel C. C. Ting decidió también ocultar su nombre en uno de sus hallazgos, la partícula *J*. La detección de esta partícula fue anunciada el mismo día por Ting, del Laboratorio de Brookhaven, y por Burton Richter, del Centro del Acelerador Lineal de Stanford. En Stanford se la llamó "partícula psi", porque las trayectorias que seguían sus partículas hijas se asemejaban a la letra griega psi. En Brookhaven, Ting le puso el nombre de "partícula *J*", porque la letra *J* se parece al carácter chino representativo de "Ting".

Lo habitual entre mineralogistas es denominar las nuevas especies en honor de alguna persona sobresaliente. Una vez agotados los apellidos, los descubridores se han puesto de acuerdo sobre dos opciones más: sólo el nombre de quien se trate (clifordita para Clifford Frondel, pues frondelita ya estaba tomado) o bien nombre y apellido (tombartita, para mayor gloria de Tom F. Barth, al preexistir ya el mineral bartita). Mineralogistas y químicos inmortalizan lugares; de la sueca Ytterby provienen los nombres de cuatro elementos: itrio, terbio, erbio e iterbio.

Las localizaciones epónimas abundan en la terminología médica (gripe asiática). En ocasiones puede incluso hacerse epónimo el nombre de un paciente singular. El bacitracín, una pomada antibiótica, se obtuvo a partir de un bacilo que fue aislado por primera vez en el cuerpo de una niña llamada Margaret Tracy (bacy + Tracy + in). Antaño, la distinción entre el nombre de un paciente o de un lugar y el nombre del descubridor era nítidamente señalada por la ausencia o la presencia de la preposición "de": se omitía ésta con el lugar (enfermedad Lyme) o con el paciente (factor sanguíneo Duffy), y no se la omitía al indicarse el descubridor (enfermedad de Bright, y así pudo comentar S. J. Perelman, "Yo tengo la enfermedad de Bright y él tiene la mía"). Sin embargo, esta distinción ha caído en desuso.

El botánico sueco Linneo estableció el primer sistema de nomenclatura binomial; en medio de sus reformas terminológicas, se paró a considerar los epónimos y decidió dejarlos de lado —sintió el "religioso deber" de conservar en los géneros los nombres de grandes botánicos. Sabía Linneo el placer que proporcionan tales designaciones, pues cuando a una menta silvestre la llamó él *Collinsonia* en honor del naturalista Peter Collinson, éste exclamó que le había otorgado así "una especie de eternidad".

Quienes se oponen al empleo de la eponimia en las ciencias no son tan entusiastas. Están en desacuerdo no sólo con las asociaciones emocionales que los epónimos suscitan, sino también con su ambigüedad —por ejemplo, cuando un apellido como Charcot o como Paget es empleado para designar dos enfermedades distintas. Son adversos igualmente a los guiones, tan útiles para juntar en tríos eponímicos, digamos, a Einstein, Podolsky y Rosen. Desde luego que los guiones pueden resultar molestos en esta construcción. Al principiante que considere el potencial de Lennard-Jones se le podrá ocurrir razonablemente que fue obra de dos personas, sólo para enterarse después de que Lennard-Jones es una misma entidad británica. O el novato podría figurarse que el interferómetro de Hanbury-Brown-Twiss tiene que ver con un grupo de tres (siendo así que, en realidad, sólo hay dos: Hanbury-Brown y Twiss). No obstante, el guión es útil en los epónimos, por su capacidad de indicar tanto el trabajo en colaboración como la secuencia de los descubrimientos. A la aproximación de Wentzel-Kramers-Brillouin se la llamó así originariamente en honor de los tres físicos que desarrollaron esa técnica; después se supo que Jeffreys, un matemático, había elaborado la aproximación bastante antes que los tres físicos. "Jeffreys" fue elegantemente añadido al comienzo del largo epónimo.

Etiquetas del estilo "aproximación de Jeffreys-Wentzel-Kramers-Brillouin" resultan demasiado apretadas y engorrosas. Eso es obvio. Pero no le preocupa mucho a la comunidad científica, que no está dispuesta a restringir tan singulares y egocéntricos tributos a sus héroes. Un objetor atribuye incluso la perduración de los epónimos a un "culto a la personalidad". Tal vez a los científicos les agrada la brevedad eponímica con que unas pocas palabras —por ejemplo, "constante de Planck"— pueden evocar muchas otras —por ejemplo, en este caso, "la constante de proporcionalidad que relaciona la energía de un cuanto de radiación electromagnética a su frecuencia". Este es, precisamente, el tipo de economía que aprecia todo aquel que crea, permítaseme el epónimo, en la navaja de Occam.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



HUMEDALES, por Jon A. Kusler, William J. Mitsch y Joseph S. Larson

Estos refugios de biodiversidad, de difícil identificación, corren peligro de desaparecer. Facilitaremos su conservación conociendo mejor sus características variables.

LA BUSQUEDA DE MATERIA EXTRAÑA, por Henry J. Crawford y Carsten H. Greiner

Entre los núcleos y las estrellas de neutrones se extiende un desierto desprovisto de materia nuclear. ¿Puede la materia de quarks extraños llenar el vacío?

TOXINAS DE CIANOBACTERIAS, por Wayne W. Carmichael

Estos venenos, que contaminan periódica y fatalmente las fuentes donde abrevan los animales, pueden perjudicar también al ser humano. ¿Cómo trocarlos en beneficio de los mismos?

RESOLUCION DE PROBLEMAS INABORDABLES, por Joseph F. Traub y Henryk Wózniakowski

Problemas cuya resolución sería de suyo imposible pueden computarse en la medida en que se acepte un margen de error pequeño en promedio.

LAS PRIMERAS REDES DE DATOS, por Gerard J. Holzmann y Björn Pehrson

La telegrafía óptica, hoy casi olvidada, transportaba, hace doscientos años, mensajes a cientos de kilómetros en unos minutos.

SEXUALIDAD ANIMAL, por David Crews

Los animales han desarrollado toda una gama de mecanismos para determinar la adquisición de rasgos masculinos o femeninos. La comparación de especies distintas ofrece atisbos sorprendentes acerca de la naturaleza de la sexualidad.

LA DIVERSIDAD LINGUISTICA DEL MUNDO, por Colin Renfrew

Colonizadores, agricultores, comerciantes o conquistadores llevaron las lenguas antecesoras de las actuales a los territorios donde se las habla. Los estudios multidisciplinares esclarecen qué papel desempeñaron unos u otros.

ACTIVACION DE PRECURSORES DE PROTEINAS, por Francesc X. Avilés, Alicia Guasch y Josep Vendrell

Muchas proteínas que desarrollan una función biológica importante se activan, en el momento en que se precisa su intervención, mediante proteolisis controlada de algunos de los enlaces peptídicos de sus precursores.

